

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

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи

Битуев Рашид Борисович



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

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
С.А. Макаров

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ АВАРИЯХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	10
1.1 Развитие промышленного производства сжиженного природного газа	10
1.2 Сжиженный природный газ как основа энергетической и экономической безопасности Российской Федерации	14
1.3 Физико-химические свойства сжиженного природного газа	18
1.4 Аварии на объектах хранения и переработки сжиженного природного газа, сопровождающиеся проливом и дальнейшим горением сжиженного природного газа	25
1.5 Оценка эффективности применения различных огнетушащих веществ	27
1.5.1 Инертные газы как средства тушения пожара пролива сжиженного природного газа	28
1.5.2 Порошковые средства тушения пожара пролива сжиженного природного газа	29
1.6 Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения пролива сжиженного природного газа	31
Выводы по первой главе.....	39
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ВЫСОКОКРАТНОЙ ПЕНОЙ.....	41
2.1 Вещества и оборудование, используемые в работе.....	41
2.2 Методика определения параметров тушения сжиженного природного газа при помощи высокочратной пены	43
2.3 Проведение экспериментальных исследований по определению основных параметров тушения сжиженного природного газа высокочратной пеной.....	47

2.3.1	Определение интенсивности выгорания сжиженного природного газа при свободном горении в противнях различного диаметра.....	47
2.3.2	Определение параметров тушения сжиженного природного газа пеной кратностью от 200 до 550 единиц при фиксированной интенсивности подачи.....	53
2.3.3	Определение параметров тушения сжиженного природного газа пеной кратностью 250 единиц при различной интенсивности подачи	68
2.3.4	Определение параметров тушения сжиженного природного газа пеной кратностью 500 единиц при различной интенсивности подачи	86
2.4	Обработка полученных экспериментальных данных.....	105
	Выводы по второй главе	107
	ГЛАВА 3 АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	109
3.1	Анализ результатов экспериментальных исследований по определению параметров тушения пожара пролива сжиженного природного газа высократной пеной.....	109
3.2	Рекомендации по применению высокократной пены для локализации и ликвидации пламенного горения пролива сжиженного природного газа	120
	Выводы по третьей главе.....	124
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
	Приложение А АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Приоритетным направлением нефтегазовой отрасли Российской Федерации является развитие инфраструктуры производства, транспортировки и потребления сжиженного природного газа (далее – СПГ) [1-3]. Помимо увеличения экспортных мощностей возрастают внутренние потребности [4-5]. Ведется проектирование и строительство заправочных станций для автомобильного транспорта, пунктов бункеровки морских и речных судов, а также железнодорожных локомотивов [6]. 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 [7].

Международная статистика свидетельствует о том, что пожары на объектах СПГ случаются ежегодно [8, 9]. Наиболее крупные из них приводят к серьезному материальному ущербу и существенно осложняют ситуацию с поставками СПГ на внешний и внутренний рынки [10, 11]. 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 [12-15]. 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)

[16, 17]. 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 [18-22]. 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 проработанности 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 [12, 22-27]. 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

[26-31]. 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 [32-38]. 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 [39-41].

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 высокократной 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.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в расширении представлений о причинах снижения интенсивности теплового излучения, и тушении проливов СПГ при использовании ВМП;

– в возможности использования разработанной 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.

Апробация результатов исследования (приложение А):

- 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 проливов 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, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 150 страницах текста, включает в себя 5 таблиц, 21 рисунок, список литературы состоит из 159 наименований.

ГЛАВА 1 ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ АВАРИЯХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

1.1 Развитие промышленного производства сжиженного природного газа

Использование природного газа в качестве энергоносителя – явление сравнительно недавнее. Впервые об этом задумались в начале шестидесятых годов. Причиной тому стало последовательное открытие и последующая разработка месторождений в Нидерландах и южной акватории Северного моря. Два мировых нефтяных кризиса, произошедшие в середине семидесятых годов, поспособствовали повышению объемов добычи природного газа. Согласно данным International Energy Agency, с 1970 по 2010 гг. доля газа в глобальном объеме потребления энергоносителей выросла с 16 до 21 %. Более экологичный (относительно нефти и угля), более безопасный (относительно атомной энергии) – природный газ начал занимать главенствующую роль в структуре энергопотребления сразу ряда стран [42, 43, 44]. Наряду с этим, исследователями-экономистами отмечается стремительный рост мирового потребления сжиженного природного газа [42, 45]. Отмечается, что в обозримом будущем объем ежегодно потребляемого СПГ перевалит отметку в один миллиард тонн. Существенный вклад в это вносится развивающимися странами Азии и Латинской Америки. Ввиду увеличенного спроса на энергоносители, в условиях ограниченности предложения, будет вестись активная деятельность по уменьшению удельной доли издержек в единице стоимости продукции [42, 46]. Эксперты предполагают, что это будет сопряжено с модернизацией оборудования, применяемого на электростанциях. Так, например, в Японии, Германии, Швейцарии и ряде других скандинавских стран после снижения объемов выработки атомной энергии, а в Германии – полного закрытия всех атомных станций, специалисты в области энергетики

отдали предпочтение газотурбинным электростанциям. Крупные промышленные конгломераты ведут технические разработки высокоэффективных газотурбинных двигателей. Помимо этого, в случае электростанций комбинированного цикла, растет и отношение произведенной энергии, относительно затраченной тепловой. Уже сейчас это отношение превышает 60 % и продолжает расти [42, 47, 48].

Проведем ретроспективный анализ развития отрасли в Российской Федерации и зарубежом.

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) [49]. Крупный проект «Kenai LNG» (Рисунок 1.1) мощностью более 1,5 млн. тонн СПГ в год был запущен уже в 1969 году компаниями «Philips» и «Сопосо». Высокая рентабельность поставок сжиженного газа на большие расстояния дала толчок к бурному развитию производств СПГ. В 1970 году компанией «LN OC» в Ливии открыто производство «Marsa El Brega» использующее инновационную технологию смешанного хладагента с предварительным пропановым охлаждением, которая используется по настоящее время на большинстве действующих проектов.



Рисунок 1.1 – Завод «Kenai LNG»

В 1973 и 1974 гг. компаниями «Government of Brunei», «Shell» и «Mitsubishi» построены два завода по производству СПГ в Брунее. В 1977 году в ОАЭ компаниями «ADNOS», «Mitsui», «BP» и «TOTAL» запущена крупнейшая, на тот момент, линия производства «ADGAS LNGT1-2» мощностью более 2,5 млн. тонн СПГ в год [4, 42, 50].

С 1978 по 2014 гг. компанией «Sonatrach» построены четыре предприятия в Алжире. Начиная с 1983 года построено: восемь заводов в Индонезии, пять – в Малайзии, четырнадцать – в Катаре, пятнадцать – в Австралии [51].

Всего за последние полвека около ста предприятий начали крупнотоннажное промышленное производство СПГ. Объем реализации СПГ в мире составляет более 400 млн. тонн, при этом больше половины производимого газа приходится на Катар и Австралию. Конечными точками цепочек поставок СПГ являются регазификационные терминалы. Более сорока крупнейших регазификационных терминалов построено в странах Азии и Европы. Наибольшее их количество находится в Японии, Италии и Испании. В зависимости от расположения регазификационные терминалы разделяют на наземные, плавучие и оффшорные – монтируемые на стационарной морской платформе [52].

Первый крупнотоннажный завод «Сахалин 2» открыт в России в 2009 году (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Завод по производству сжиженного природного газа «Сахалин II»

В 2019 году для поставок в Балтийском регионе и бункеровки судов сжиженным газом запущен проект «Высоцк СПГ» [53, 54]. Основным объектом проекта «Ямал-СПГ» (Рисунок 1.3) является комплекс по сжижению природного газа, в состав которого входят четыре технологических линии, производительностью более 2500 тонн в час с четырьмя изотермическими резервуарами вместимостью 160000 м³ каждый. Весьма 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 сорока миллионов тонн СПГ, а после реализации строящихся проектов производство СПГ должно вырасти более чем в три раза [55].



Рисунок 1.3 – Завод по производству сжиженного природного газа «Ямал СПГ»

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации [2], ключевой мерой развития производства сжиженного природного газа является дальнейшая либерализация экспорта. Для этого создается механизм контроля и исключения, нарушающей экономические интересы России, конкуренции на мировых рынках между СПГ и транспортируемым по трубопроводам природным газом [7]. Следовательно, при планировании кластеров по производству СПГ учитывается

возможность реализации потенциала газовых месторождений и Единой системы газоснабжения. Отечественные запасы природного газа распределены неравномерно [56].

На Западную Сибирь приходится 63 процента всех запасов. Ресурсная база Ямало-Ненецкого АО позволяет выполнять поставки через Единую систему газоснабжения как для внутреннего рынка, так и для экспорта СПГ. Потенциальными точками крупнотоннажного производства СПГ, с учетом логистической доступности газозовов, являются в первую очередь Ямал, Гыданский полуостров, север Красноярского края, побережье Дальнего Востока и остров Сахалин. В 2021 году распоряжением Правительства Российской Федерации № 640-р утверждена долгосрочная программа производства, включающая план мероприятий по реализации развития крупнотоннажного и малотоннажного производства СПГ [7]. В сегмент малотоннажного производства СПГ входят заводы мощностью до 10 тонн в 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 на криогенные АЗС планируется строительство 30 локальных точек и 50 точек реализации на основных транспортных магистралях [56].

1.2 Сжиженный природный газ как основа энергетической и экономической безопасности Российской Федерации

Энергетика в структуре российской экономики имеет гораздо большее значение, чем в ряде развитых стран. Для этого есть важные предпосылки, основная из которых – это высокий ресурсный потенциал РФ. Энергетический сектор, таким

образом, занимает ключевое положение в экономике страны. Российский энергетический сектор имеет региональное значение. Энергетика во многом определяет не только показатели общественного производства других отраслей, но и отражает региональную экономическую специализацию регионов. На территориях с большими запасами природных ресурсов и преимущественно с добывающими отраслями возможна широкая экономическая специализация [5].

Энергетический сектор России обладает мощным производственным, технологическим и кадровым потенциалом. Он способен удовлетворить необходимые потребности потребителей в энергетических продуктах и услугах. Кроме того, именно энергетический сектор является ведущим звеном в обеспечении экономической безопасности и национальной безопасности в целом, определяя основные показатели экономической безопасности. Ведущей в энергетическом комплексе России является нефтегазовая отрасль. Однако именно газовая отрасль в будущем будет наиболее перспективной отраслью. Накопленных запасов природного газа достаточно для использования как внутри страны, так и на экспорт до 2040 года. Также важно отметить, что особое внимание уделяется капитальным вложениям в уникальные газовые месторождения Восточной Сибири и северных регионов страны, которые позволят увеличить экспорт газа на внешние рынки [5, 57].

Определив лидирующее положение энергетической безопасности в системе экономической безопасности России, можно сделать вывод, что газовая отрасль, ее состояние и динамика в решающей степени определяют совокупность условий и факторов, а также ключевые направления деятельности. В частности, при разработке и реализации стратегических решений, которые в долгосрочной перспективе позволят обеспечить независимость и защиту национальной экономики от внутренних и внешних угроз, эффективность производства и устойчивый рост, конкурентоспособность отечественного энергетического сектора и российской промышленности в целом. Что касается непосредственно сжиженного природного газа, то его добыча и экспорт обоснованы высоким уровнем спроса на данный энергоноситель на мировых рынках. Данные статистических обзоров

ситуации на мировых рынках подтверждают данный тезис. Так, страны Евросоюза в 2023 г. закупили рекордные объемы СПГ из России: по итогам первых семи месяцев 2023 года импорт российского СПГ вырос на 40 % (с 15 млн до 22 млн куб. м). Согласно данным Global Witness, с января по июль 2023 г. доля ЕС в российском экспорте СПГ составила 52 % [58].

Действительно, СПГ обладает рядом преимуществ перед иными видами энергоносителей. Прежде всего, транспортировка СПГ не требует постройки сложной и дорогостоящей системы газопроводов, пролегающих по территории ряда государств, а происходит посредством трансокеанских поставок. Данная особенность решает не только ряд проблем, связанных с дороговизной транспортировки газа по газопроводам, но также проблему уязвимости экспорта газа по трубопроводной системе [59-61]. Высокий спрос на СПГ обоснован также тем, что данный ресурс превосходит по своим качественным характеристикам трубопроводный газ. Так, отмечается, что СПГ характеризуется значительно меньшим количеством примесей, чем трубопроводный газ, а уровень метана значительно выше в СПГ. Данных характеристик удастся добиться в процессе технологического сжижения природного газа. Помимо этого, важно отметить относительно высокий уровень экологичности процессов, связанных с производством, транспортировкой СПГ и получением энергии на основе данного вида энергоносителей [62]. Производство и транспортировка СПГ требуют инновационных подходов и реализации высокотехнологичных решений, поэтому решение осваивать мировой рынок СПГ для страны-экспортера становится, пусть и косвенным, но важным фактором развития научно-технологического потенциала [63, 64].

Не случайно ряд стран-поставщиков СПГ пополняют государства, не просто обладающие месторождениями энергоресурсов, но систематически развивающие свой научно-технологический потенциал: помимо РФ, это Австралия, Кувейт, ОАЭ, Сингапур и др. Для Российской Федерации очень важно «встроиться» в развивающийся рынок СПГ. Так, по данным Международного энергетического агентства, мировой спрос на энергию, несмотря на замедление темпов роста, к 2040

году увеличится на 30 %. Потребление природного газа будет расти во всем мире. Ожидается, что основной рост спроса будет на Ближнем Востоке, а также в Индии и Китайской Народной Республике [58, 65, 66].

Отмечается, что в течение прогнозного периода Соединенные Штаты, а затем страны Африки к югу от Сахары увеличат экспорт на 90 млрд. м³, Россия увеличит экспорт сжиженного природного газа на 60 млрд м³. Для РФ усилия по развитию своего участия на мировом рынке СПГ обоснованы в силу возможности решить следующие стратегические задачи: обновление стратегии добычи, производства и экспорта энергоресурсов; развитие новых технологий; приобретение устойчивых позиций на рынке энергоресурсов; усиление политического авторитета на мировой арене [67]. Интересно, что развитие сектора СПГ несет в себе также положительное влияние на развитие инвестиционного климата в Российской Федерации. Поскольку освоение рынка СПГ сопряжено с высоким уровнем доходности, то потенциальные инвесторы готовы вкладывать средства в поиски новых территорий добычи природного газа для целей последующего производства СПГ, создавать производственные мощности, новые рабочие места, развивать социальную инфраструктуру. Для развития данной ниши стране-экспортеру требуется активно развивать инновации в процессы производства, транспортировки и регазификации СПГ. Особое значение имеет газотранспортная инфраструктура, для развития которой требуется строительство хранилищ СПГ, а также систем его транспортировки. В этом аспекте важно развивать новые технологии, подходы и конструкторские решения. Особый акцент следует сделать на обеспечении пожарной и промышленной безопасности всего цикла производства, хранения и транспортировки СПГ [5].

Это означает, что необходимо развивать собственные уникальные технологии создания инфраструктуры СПГ. Особенно важно построить по собственным технологиям новые заводы по сжижению газа, а также танкеры для морской транспортировки СПГ (т.к. именно морской путь доставки СПГ является наиболее востребованным и перспективным) [68]. Так, существующие сегодня в стране заводы по производству СПГ несколько лет работают с превышением

плановых мощностей. К примеру, завод «Ямал СПГ» в 2023 г. произвел 21 млн. тонн СПГ, а плановая мощность данного предприятия рассчитана на 17,4 млн. тонн [69].

В конце 2022 г. был введен в эксплуатацию завод по производству СПГ «Портовая» в Ленинградской области, тем не менее, мощность данного завода лишь 1,5 млн. тонн СПГ в год. Правительство ставит перед отраслью амбициозную задачу: выйти на уровень производства СПГ 100 млн. тонн в год. Для реализации этой задачи нужна серьезная технологическая и инновационная перестройка данной инфраструктуры. Важна технологическая независимость при реализации проектов в сфере СПГ – такая независимость будет являться гарантом энергетической безопасности РФ. К примеру, на данный момент реализуются такие проекты по строительству комплексов производства СПГ, как «Арктик СПГ – 2», а также комплекс в Усть-Луге Ленинградской области [70, 71]. В первой половине 21 века проблема реформирования российской газовой отрасли становится наиболее актуальной, что также связано с растущими рисками и угрозами в области обеспечения энергетической безопасности Российской Федерации. Экспорт природного газа (включая сжиженный природный газ) играет особую роль в обеспечении безопасности, обеспечивая 10 % валютных поступлений от экспорта в федеральный бюджет и 8-12 % от общего объема российского экспорта [5, 72].

1.3 Физико-химические свойства сжиженного природного газа

Экспертами отмечается, что в настоящее время происходит переход от жидких моторных топлив к сжиженным газам. Сжиженные газы имеют более высокое октановое число, поэтому газообразные моторные топлива не содержат дополнительных примесей и, следовательно, при сгорании сжиженных газов выделяется меньше токсичных веществ. Помимо этого, одной из отличительных особенностей природного газа, предопределивших его использование в качестве

газомоторного топлива, является высокая теплота сгорания стехиометрической смеси. При этом, сжиженный газ обладает более широкими пределами воспламенения, что опять же, выгодно выделяет его на фоне классических жидких углеводородов, применяемых в транспорте. Возможность его сжижения для снижения объема при транспортировке и хранении позволяет снизить удельные затраты на его транспортировку, а также повышает долю его потребления в мире [73-78].

При анализе сценариев развития аварийной ситуации необходимо учитывать то, что СПГ – многокомпонентная жидкость, в состав которой, помимо метана и других углеводородов, может входить азот, сероводород, вода и двуокись углерода. Далее предлагается рассмотреть наиболее часто встречающиеся компоненты смеси сжиженного природного газа, представляющие интерес своим влиянием на свойство итоговой смеси [73-78].

Вода (H_2O). Температура кипения воды при атмосферном давлении составляет 273 К. Наличие воды в хранящейся смеси может вызвать целый ряд предаварийных ситуаций. Например, при отрицательных температурах, вода будет кристаллизоваться, что может вызвать закупоривание элементов оборудования. Для выведения воды из смеси на производствах по переработке СПГ проводятся процедуры по его осушению [73, 79].

Сероводород (H_2S). Температура кипения при атмосферном давлении 212,4 К. Сероводород – активное соединение, содержание которого в готовой смеси стараются минимизировать. Будучи кислым компонентом, может вызвать коррозию технологического оборудования [73, 79].

Диоксид углерода (CO_2). Температура кипения при атмосферном давлении 351,9 К. Содержание диоксида углерода в готовой смеси предписывается минимизировать по причине того, что диоксид углерода при выполнении условий пересыщения может выделяться в виде твердой углекислоты. Её нахождение в технологическом оборудовании изменяет тепловые и гидродинамические характеристики затронутых агрегатов, что может привести их к выходу из строя и созданию аварийной ситуации [73, 79].

Азот (N_2). Инертный газ. Не представляет опасности с точки зрения пожаровзрывобезопасности напрямую. Температура кипения при атмосферном давлении 77,36 К. Поскольку СПГ является криогенной жидкостью, то при хранении, он очень чувствителен к изменению температуры окружающей среды. Из-за этого, в процессе его хранения, часть газов будет постоянно выкипать, т.е. возвращаться к газообразному состоянию. Такой газ называют – отпарной газ. Частично в этом может помочь азот, который содержится в смеси природного газа. Поскольку температура кипения азота ниже, чем у СПГ, то при повышении температуры, сначала испаряется именно азот, что позволяет снизить величину образования отпарного газа при эксплуатации резервуаров с СПГ [73, 79, 80]. В соответствии с ГОСТ Р 57431-2017 [78] современный СПГ состоит в основном из метана. В оставшуюся часть входят этан, пропан, бутан, пентан и азот. При нормальных условиях – это легкий бесцветный горючий газ без запаха [73].

СПГ классифицируется в соответствии с требованиями ГОСТ 34894-2022 [81]. Основным показателем, определяющим марку СПГ, является молярная доля метана. Данные показатели приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Молярная доля метана в СПГ различных марок

Наименование показателя, единицы измерения	Норма		
	Марка А	Марка Б	Марка В
Молярная доля метана, %	99,0	80,0	75,0

Низшая теплота сгорания природных газов высокая — до 47 000 кДж/м³. По теплоте сгорания 1 м³ природного газа эквивалентен 1,0-1,12 л бензина [74].

На Рисунке 1.4 представлена зависимость, характеризующая соответствие температурных и концентрационных пределов распространения пламени СПГ, содержащего 95 % мольных долей метана. У сжиженного природного газа с таким химическим составом нижним температурным пределом распространения пламени является температура -177°С [82, 83].

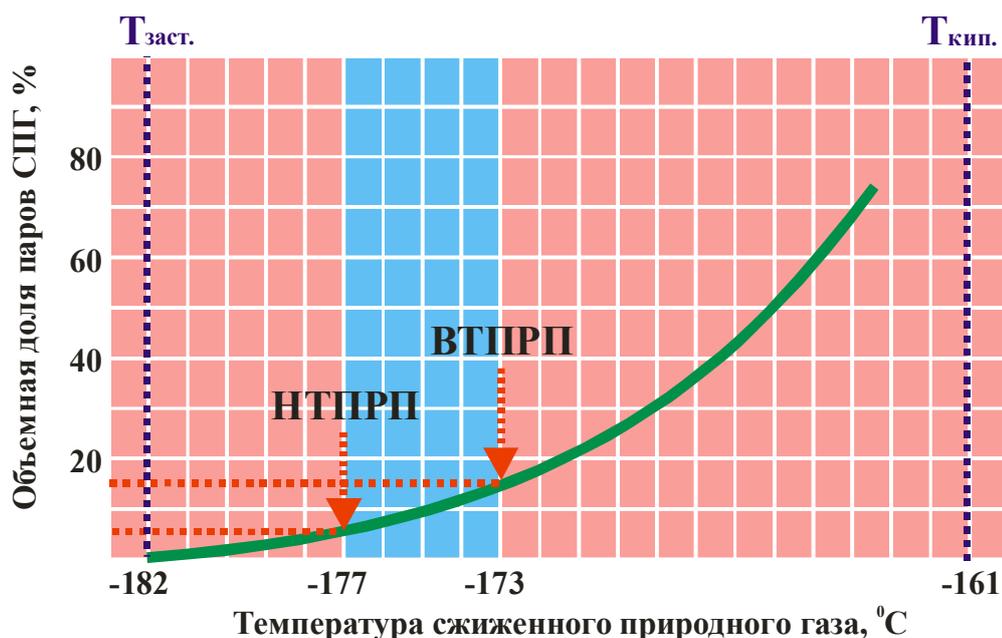


Рисунок 1.4 – Температурные пределы распространения пламени СПГ

Помимо этого, одним из ключевых физических параметров СПГ, влияющим на его пожарную опасность, является интенсивность испарения [83-86]. В случае пролива сжиженного газа и его дальнейшем растекании по поверхности, газ будет интенсивно нагреваться, а после момента достижения температуры кипения, СПГ начнет испаряться [87]. Интенсивность испарения, при таком варианте, будет иметь резкий скачок в моменте контакта пролившейся жидкости с поверхностью, после чего интенсивность испарения выйдет на постоянное значение. Оно будет зависеть от типа поверхности, на которую пролился СПГ, а также от энергии, которую газ получит из окружающей атмосферы (Таблица 1.2) [78, 88, 89].

Таблица 1.2 – Интенсивность испарения СПГ с различных поверхностей

Тип поверхности	Интенсивность испарения СПГ с поверхности через 60 с, кг/(м ² ·ч)
Бетон	130
Сухой песок	195
Влажный песок	240
Щебень	480
Вода	600

Одним из важных параметров СПГ является его плотность, поскольку она влияет на параметры его транспортировки, хранения и обработки. Плотность СПГ зависит от ряда параметров, таких как: состав, температура окружающей среды, а также давления, при котором СПГ хранится [90]. При нарушении условий хранения или при разгерметизации технологического оборудования, плотность сжиженного газа будет увеличиваться.

С точки зрения обеспечения пожарной безопасности на объектах с оборотом сжиженного природного газа важным будет рассмотреть такой физический параметр, как температура пламени СПГ. Множество исследований на эту тему проводились в США [36, 88, 91]. В 2005-2006 гг. на базе Техасского университета «Texas A&M University» были проведены крупномасштабные испытания, целью которых было установление ряда численных характеристик горящего СПГ (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Кадры из видеотчета о результатах испытаний. Стационарный генератор ВКП на полигоне университета «Texas A&M University»

Одним из исследуемых параметров была температура пламени сжиженного природного газа на различных отметках высоты. Испытания проводились на модельном обваловании площадью 65 м². Сжиженный природный газ заливался в обвалование из возимой автоцистерны до отметки в 15 см от дна обвалования. Несмотря на то, что стандартизированная методика проведения испытаний

регламентирует применение СПГ с молярной долей метана более 85 %, из соображений безопасности в экспериментах использовался СПГ с молярной долей метана более 95 % [36]. После перегона автоцистерны на безопасное расстояние производился поджиг СПГ. После того, как пламя охватило всё зеркало сжиженного природного газа, производилась подача ВМП кратностью 500 из стационарных генераторов высокократной пены.

Измерялась температура пламени при свободном горении и во время подачи ВМП. Результаты испытаний представлены на Рисунке 1.6.

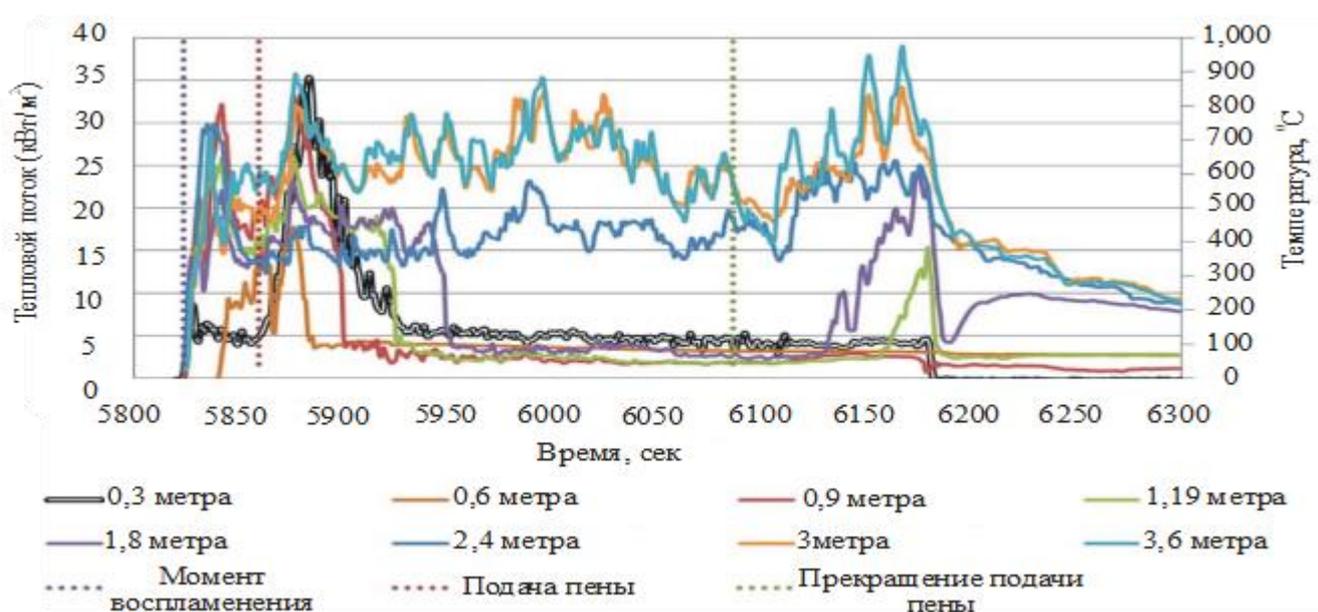


Рисунок 1.6 – Тепловой поток и температура пожара пролива СПГ на различных отметках высоты [36]

На различной высоте от поверхности свободно горящего СПГ пламя имеет различный диапазон температур. Максимальная температура пламени зафиксирована на высоте 3,6 м. После подачи ВМП произошла кратковременная интенсификация пламенного горения. Температура пламени достигает максимального значения и начинает резко снижаться. Примерно через 20 секунд уровень теплового потока снижается более чем в семь раз, это сопровождается снижением температуры пламени [36].

В контексте собственного диссертационного исследования, данную работу будет полезно рассмотреть через призму теории прекращения процессов,

поддерживающих горение, предложенную Я. Б. Зельдовичем и используемую в дальнейшем И.М. Абдурагимовым [92-94]. Яков Борисович предполагал, что процесс горения вещества можно прекратить путем нарушения теплового равновесия в зоне химических реакций. В результате самопроизвольный характер протекания реакции перестанет существовать и горение прекратится. Достигнуть этого он предлагал путем воздействия на температуру пламени в зоне горения. В момент, когда температура пламени в зоне горения опустится до отметки, именуемой им температурой потухания, реакция горения прекратится. Данное условие представлено в виде формулы (1.1):

$$T_{\text{пот}} = T_{\text{ад}} - \Delta T, \quad (1.1)$$

где $T_{\text{пот}}$ – температура потухания;

$T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура горения;

ΔT – изменение температуры.

Тепловые потери оказывают влияние на температуру в зоне горения, следовательно, понижают скорость протекания реакции. Снижение скорости протекания химической реакции, в свою очередь, приводит к тому, что пламя распространяется медленнее, что еще сильнее снижает скорость протекания реакции. Пламя начинает затухать и в определенный момент потухает полностью, при этом интенсивность тепловыделения должна быть равна интенсивности теплоотвода. Я. Б. Зельдович получил максимально возможную величину снижения температуры диффузионного пламени, при которой наступает потухание. И.М. Абдурагимов, решив систему уравнений, предложенную Я.Б. Зельдовичем, получил выражение для расчета температуры потухания (1.2).

$$T_{\text{ад}} - T_{\text{пот}} \approx \frac{3 \cdot R \cdot T_{\text{ад}}^2}{E_a}, \quad (1.2)$$

где $T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура пламени;

R – универсальная газовая постоянная;

E_a – энергия активации.

На практике в зоне горения реализуется не адиабатическая, а действительная

температура горения. Она существенно ниже адиабатической, вследствие потери тепла, и будет связана сразу с несколькими физико-химическими процессами. К ним можно отнести: более высокий уровень светимости диффузионного пламени (из-за наличия в зоне горения продуктов неполного сгорания веществ), большую зону реакции, а также конвективный теплообмен [95]. Эти потери, на реальном пожаре, в среднем составляют 30 % от всего тепла, которое выделяется при горении [96-98]. Тогда, уместно будет называть полученное значение «действительной температурой потухания», а формула (1.2) принимает следующий вид:

$$T_{\text{пот}}^{\text{действ}} = T_{\text{пот}}^{\text{ад}} \cdot 0,7 = \left(T_{\text{ад}} - \frac{3 \cdot R \cdot T_{\text{ад}}^2}{E_a} \right) \cdot 0,7 \quad (1.3)$$

Выразив из выражения (1.3) действительную температуру потухания, определяется условие прекращения горения пожара пролива СПГ, что будет важно в контексте данного диссертационного исследования.

1.4 Аварии на объектах хранения и переработки сжиженного природного газа, сопровождающиеся проливом и дальнейшим горением сжиженного природного газа

Высокая концентрация сжиженного природного газа, который является пожаровзрывоопасным веществом, на относительно небольшой площади хранилищ создаёт серьёзную проблему обеспечения пожарной безопасности наземных объектов.

Основной опасностью при транспортировке сжиженного природного газа является его экстремально низкая температура, которая может привести к охрупчиванию материалов, что может вызвать утечку или разрушение конструкций технологического оборудования. Опасен СПГ и для персонала, осуществляющего его транспортировку, поскольку при прямом контакте с кожными покровами, СПГ приводит к сильному обморожению живых тканей [99].

Примером аварии на объекте хранения СПГ является инцидент в Кливленде (США), где из-за охрупчивания металла разрушились стальные оболочки изотермического двухстенного хранилища. В результате произошёл внезапный пролив СПГ с температурой $-156\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате аварии погибли 128 человек, около 400 получили травмы. Также были полностью уничтожены: газовый завод; 10 административных зданий; 80 домов, расположенных в 400 метрах от места выброса. Общий ущерб составил 6,8 миллиона долларов [11].

За последние годы наиболее серьёзной в мире аварией на объекте с наличием СПГ является произошедшая 19 января 2004 г. авария на комплексе СПГ в Скикда (Алжир) Компании «Сонатрак». 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. [100].

27 июня 2021 года в городе Вальдес, штат Аляска, произошёл пожар на нефтеперерабатывающем заводе Petro Star, принадлежащем корпорации Arctic Slope Regional. Согласно официальной информации из открытых источников, пожар начался примерно в 17:00. Сообщалось, что со стороны завода раздался сильный взрыв, после чего в небо поднялись густые клубы дыма.

Восьмого июня 2021 года в штате Техас, в городе Фрипорте, произошёл крупный пожар на терминале по производству СПГ. Пожар принял федеральный характер. К его тушению привлекли авиацию и береговую охрану штата. Когда авария была ликвидирована, оценочная комиссия по выяснению причин аварии сообщила, что завод выбыл из числа действующих минимум на два месяца. Настолько масштабны и необратимы были последствия пожара СПГ [101].

В 2022 году произошёл крупный пожар на заводе «Freeport LNG» в г. Кинтан. Большое количество аварий на объектах СПГ также произошло в Великобритании и странах Евросоюза [102].

Анализ статистики показывает, что в рассмотренном периоде, начиная с лета 2021 года и заканчивая зимой 2023 года, наблюдается устойчивая картина: количество пожаров на объектах хранения и переработки СПГ непрерывно растёт

[103, 104].

Проведенный экспертами статистический анализ аварийных ситуаций (Рисунок 1.7), произошедших на предприятиях с оборотом СПГ показывает нам, что более половины всех происшествий представляли собой пожар пролива СПГ [99, 105, 106].

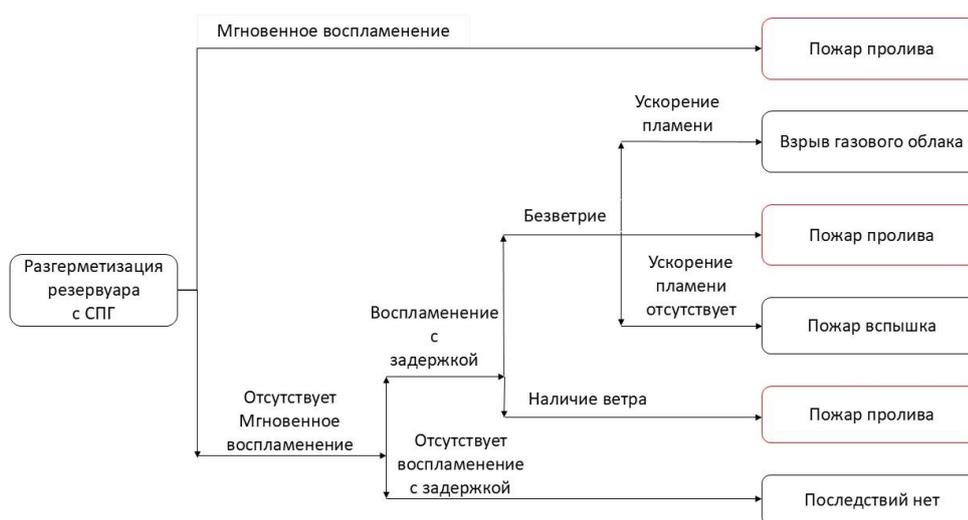


Рисунок 1.7 – Дерево событий, построенное на основе статистики аварийных ситуаций на объектах с оборотом СПГ

В соответствии с требованиями нормативных документов при загорании пролитого на поверхность земли СПГ рекомендуется дать возможность ему гореть под контролем, принимая меры к перекрытию доступа газа к очагу пожара. После прекращения доступа природного газа к очагу пожара следует приступить к ликвидации возможного вторичного пожара имеющимися средствами пожаротушения. В случае крупных аварий, когда невозможно прекратить доступ газа к очагу возникшего пожара, нецелесообразно производить тушение горящего природного газа. В этом случае необходимо защищать окружающие объекты от непосредственного воздействия очага горения (тепловое излучение, распространение горения) водяным орошением [107].

1.5 Оценка эффективности применения различных огнетушащих веществ

Сжиженный природный газ является криогенной жидкостью, поэтому массовое введение его в торговый оборот как источника энергии – явление сравнительно недавнее [5, 79]. В связи с этим, в вопросах локализации и ликвидации пламенного горения проливов СПГ остается много темных пятен. К настоящему времени, учеными, специалистами и экспертами проведено достаточно большое количество работ, связанных с оценкой эффективности применения различных огнетушащих веществ: порошковые средства пожаротушения, огнетушащие газы и воздушно-механическая пена. При этом единого мнения в вопросе выбора огнетушащего вещества нет [17, 18, 108-113].

Далее рассмотрим основные огнетушащие вещества подробнее.

1.5.1 Инертные газы как средства тушения пожара пролива сжиженного природного газа

Основной трудностью применения газовых средств тушения пожара пролива СПГ является создание требуемой концентрации огнетушащего газа на открытом воздухе. Возникающие конвективные потоки, многометровая высота пламени и наличие ветра препятствуют сосредоточению в очаге пожара необходимого количества огнетушащего газа, что ведет к повышенному его расходу. В расчетах по газовому тушению также необходимо учитывать то, что метан, образовавшийся в результате испарения СПГ становится легче воздуха. В связи с относительной дешевизной и доступностью предлагается использование в качестве огнетушащего вещества углекислоты и сжиженного азота [77, 114, 115].

В отечественной литературе рассматривается исследование, посвященное этой теме [116]. В нем специалистами был проведен ряд экспериментов по тушению сжиженного природного газа при помощи сжиженного азота. Исследования выполнялись с применением противней квадратной формы размерами $0,25 \text{ м}^2$, $0,5 \text{ м}^2$, $0,7 \text{ м}^2$, 1 м^2 с высотой стенки 150 мм в качестве модельных

очагов пожара. В ходе исследований жидкий азот из сосуда Дьюара выливали в модельный очаг пожара. В результате экспериментальных исследований установлено, что для полного тушения сжиженного газа необходимо установленное количество азота, для покрытия слоя сжиженного газа слоем сжиженного азота толщиной 3–4 мм. При таких условиях тушение происходило в течение 4 секунд. Авторы исследования связывают эту разницу с различными физическими свойствами различных газов, в первую очередь это связано с разницей температур кипения сжиженного азота, сжиженного углеводородного газа и сжиженного природного газа. Высокая интенсивность теплового потока от пропана из-за существенной разницы температур кипения приводит к интенсивному испарению сжиженного азота и повышению его расхода на тушение. В рамках данных исследований, специалистами были проведены опыты по тушению твердой (хлопьевидной) углекислотой наибольших очагов горения СПГ, по ликвидации пламенного горения твердой углекислотой малых модельных очагов с сжиженным природным газом. Установлено, что удельный расход углекислоты при сравнении с жидким азотом возрастает в 2,5 раза. Результаты экспериментальных исследований подтвердили существенный вклад жидкого азота в процесс ликвидации пламенного горения за счет низкой температуры кипения и охлаждения испаряющегося азота, что показало возможность ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа твердой углекислотой [116, 117].

1.5.2 Порошковые средства тушения пожара пролива сжиженного природного газа

Анализируя отечественные и зарубежные нормативные документы, установлено, что для комплексного обеспечения пожарной безопасности объектов с оборотом СПГ, рекомендуется применение порошковых средств пожаротушения.

Рекомендуется применение переносных и передвижных порошковых огнетушителей. Переносные порошковые огнетушители имеют заряд, в состав которого входят гидрокарбонатные натриевые или калиевые соли. Масса заряда составляет 9 кг. Огнетушители обеспечивают массовый расход порошка 0,45 кг/с. Передвижные порошковые огнетушители имеют заряд массой 57 кг. Огнетушители обеспечивают массовый расход порошка 0,9 кг/с [17, 108, 113, 118-121].

Для ликвидации пламенного горения порошок должен распыляться над поверхностью СПГ. Перемешивание подаваемого порошка и жидкой фазы СПГ должно быть исключено. Контакт порошка с жидкой фазой СПГ приводит к интенсификации испарения СПГ. Для ликвидации горения СПГ весь порошок должен подаваться над поверхностью СПГ, непосредственно в пламя. Помимо этого, принимаются меры по устранению источников повторного воспламенения паров СПГ от нагретых поверхностей путем их охлаждения. В случае повторного воспламенения паров СПГ, для тушения требуется такое же количество порошка [112, 120, 121]. Используемые для тушения СПГ порошки и пенообразователи должны быть совместимы. В соответствии с рассматриваемым стандартом воздушно-механическая пена снижает интенсивность теплового потока горящего пролива сжиженного природного газа. Применяются специализированные системы генерации пены, предназначенные для работы в условиях высокой интенсивности теплового потока при горении СПГ, исключающие попадание воды и рабочего раствора в пролив горящего СПГ. На задвижках системы аварийного отключения технологического процесса, на участках приема и отгрузки сжиженного природного газа, на насосах для перекачивания сжиженного природного газа, на дыхательных трубопроводах сброса паров из резервуаров требуется дополнительно установить систему порошкового пожаротушения или предусмотреть наличие автомобиля порошкового пожаротушения [17, 112, 121].

Применение порошковых средств пожаротушения целесообразно для ликвидации пламенного горения сжиженного природного газа, поверхность которого уже покрыта пеной. Порошок также может быть использован для дотушивания остаточного горения поверхности пенного слоя при невозможности

обеспечить требуемую интенсивность подачи высокократной пены. Совместное применение порошка и воздушно-механической пены целесообразно. Высота пламени СПГ затрудняет образование требуемой огнетушащей концентрации порошка в очаге горения. Удельный расход порошка для дотушивания горящего пролива СПГ, покрытого слоем пены, должен составлять 2 кг/с [82].

1.6 Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения пролива сжиженного природного газа

К аварийной ситуации, сопровождающейся дальнейшим воспламенением СПГ могут привести процессы, оказывающие влияние как на устойчивость функционирования, так и на конструктивную целостность резервуаров, сосудов, аппаратов и трубопроводов. В настоящее время ведется доработка нормативных документов, связанных с вопросами пожарной безопасности объектов с оборотом СПГ. Несмотря на расширение соответствующей нормативной базы, предлагаемая в настоящее время тактика тушения сжиженного природного газа нуждается в доработке [107, 122]. Специалисты оценивают возможность возникновения пожаровзрывоопасных концентраций и делают предположение того, что ликвидировать горение пролива сжиженного природного газа в отдельных случаях не целесообразно, потому что это может привести к загазованности территории объекта [123-128]. Эти опасения вошли и в действующие нормативные документы. В соответствии с принятыми сводами правил «При загорании пролитого на поверхность земли СПГ рекомендуется дать возможность ему гореть под контролем, принимая меры к перекрытию доступа газа к очагу пожара. После прекращения доступа природного газа к очагу пожара следует приступить к ликвидации возможного вторичного пожара имеющимися средствами пожаротушения. В случае крупных аварий, когда невозможно прекратить доступ газа к очагу возникшего пожара, нецелесообразно производить тушение горящего

природного газа. В этом случае необходимо защищать окружающие объекты от непосредственного воздействия очага горения водяным орошением. Использование воды для тушения пожаров проливов СПГ не допускается, поскольку поступление воды усиливает интенсивность испарения разлившегося СПГ и, как следствие, интенсивность его горения. Тушение горящего пролива СПГ следует проводить только тогда, когда горение может привести к каскадному развитию аварии, при этом должны быть приняты меры к контролю и борьбе с загазованностью [16, 129]. Таким образом, не понятно, что же нужно сделать первому РТП по прибытию к месту пожара. Также не понятно, что необходимо предпринять, если часть поданной на орошение объекта воды попадает на место пролива СПГ и приведет к интенсификации горения. Если прекратить охлаждение, тогда воздействие тепла от очага пожара приведет к разрушению объекта защиты. Тогда единственным вариантом предотвращения эскалации является только тушение. И обойтись здесь порошковыми огнетушителями представляется возможным только в том случае, если их использование персоналом объекта произойдет начальной стадии пожара. Тем более данные по нормативным значениям требуемого удельного расхода порошка и интенсивности его подачи также отсутствуют. Поэтому пожарным подразделениям нужно предложить конкретные варианты выполнения своей боевой задачи с применением стандартизованных огнетушащих веществ и стандартизованных средств подачи, предназначенных для тушения СПГ [82].

Первые эксперименты по практическому применению ВМП для снижения интенсивности теплового излучения от горящего пролива СПГ проводились в 1960 и 1961 гг. компанией «Bureau of Mines» в США [130, 131]. С 1961 по 1964 гг. аналогичные испытания проводились в Японии компанией «TokyoGas» [132]. 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 [133, 134].

В 1975 г. компания «BritishGas» повторила выполненные эксперименты для пены кратностью 1000 единиц, а для пены кратностью 500 единиц спустя шесть лет проведены испытания компанией «Shell Thornton». В 1991 г. проведены испытания по применению ВКП компаниями «Shell» и «Gas de France» [135].

Аналогичные испытания в настоящее время проводят фирмы, занимающиеся пожаротушением и разработкой пожарно-технического вооружения, такие как: «Ansul», «Williams», «Angus», «Пожнефтехим», «Эгида ПТВ» [136-140]. Результаты этих исследований нашли отражение в иностранной и отечественной нормативной литературе. Для снижения теплового потока от пламени горящего пролива СПГ предлагается применять ВКП кратностью от 500 до 1000 ед [121]. При этом, с увеличением кратности пены, для достижения десятикратного снижения интенсивности теплового потока требуется увеличение интенсивности подачи пены. Таким образом, увеличение кратности в этом диапазоне ведет к снижению её эффективности [36, 141].

То есть технология пенного пожаротушения предусматривает возможность локализации и дальнейшего контролируемого выгорания СПГ при одновременном снижении пламенного горения и теплового потока от него (Рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Результаты измерения теплового потока при реализации технологии контролируемого выгорания СПГ [36]

Следует отметить, что использование пены в технологии контролируемого

выгорания позволяет предотвратить загазованность территории объекта, чего нельзя достичь, применяя исключительно порошковые средства. К сожалению, в зарубежных нормативных актах отсутствуют данные о конкретной величине требуемой интенсивности непрерывной подачи, а также о составе и показателях качества используемых пенообразователей для тушения пожаров сжиженного природного газа.

Из текста документов следует, что использование порошка, целесообразно для либо тушения небольших проливов СПГ, либо для дотушивания пролива, покрытого пенным слоем. В свою очередь основное или дополнительное применение воздушно-механической пены может решить вопросы, освещаемые в разработанных отечественных сводах правил, а именно: снизить тепловое излучение от очага пожара, обеспечить контролируемое выгорание СПГ, предотвратить загазованность территории и, в случае необходимости, ликвидировать горение [107, 122]. Однако, незакрытым остается вопрос выбора оптимальной кратности ВМП и выбора типа пенообразователя.

Фундаментальные принципы применения ВКП в пожаротушении сформированы А.Ф. Шароварниковым [142]. Большое количество работ по пенному тушению розливов СПГ и СУГ выполнено И.М. Абдурагимовым и Г.Н. Куприным на базе «НПО Сопот» [39-41]. Авторы предполагают, что при всех сценариях развития аварийной ситуации, обусловленной проливом либо истечением СПГ или СУГ (кроме варианта внезапного взрыва газозвушной смеси в момент истечения флюида), наиболее перспективными и целесообразными представляются попытки управления развитием аварийной ситуации с использованием пен средней кратности. Взрывоопасные концентрации газа ликвидируются воздушно-механической пеной низкой и средней кратности из раствора синтетического углеводородного пенообразователя путем образования на поверхности СУГ и СПГ слоя пены, состоящего из тонкого, неравномерно распределённого слоя льда, к которому «прикрепляется» слой замороженной пены, над которым расположен слой мокрой незамороженной пены. Исследователями также предложен способ оценки свойств противопожарной пены с использованием

в качестве криогенной жидкости сжиженного азота [39].

Исследования по выбору оптимальной кратности пены были проведены ранее. Ключевым параметром в этом случае является величина, на которую происходит интенсификация парообразования СПГ при контакте с воздушно-механической пеной [143].

Точно рассчитать величину увеличения скорости испарения сжиженного природного газа от контакта с воздушно-механической пеной достаточно сложно по причине изменения структуры пенного слоя [144].

Со временем происходит обезвоживание верхних слоев пены в результате синерезиса, что приводит к снижению кратности нижних слоев пены. Однако если этим параметром пренебречь и допустить то, что пенный слой является моодисперсным, можно определить площадь пятна контакта воздушно-механической пены с поверхностью сжиженного природного газа.

На Рисунке 1.9 представлены диаграммы, характеризующие долю горючей жидкости, контактирующей с воздушно-механической пеной различной кратности. Опираясь на справочные данные скорости испарения сжиженного природного газа, можно в первом приближении дать оценку увеличения газообразования в момент контакта сжиженного природного газа с воздушно-механической пеной [143].

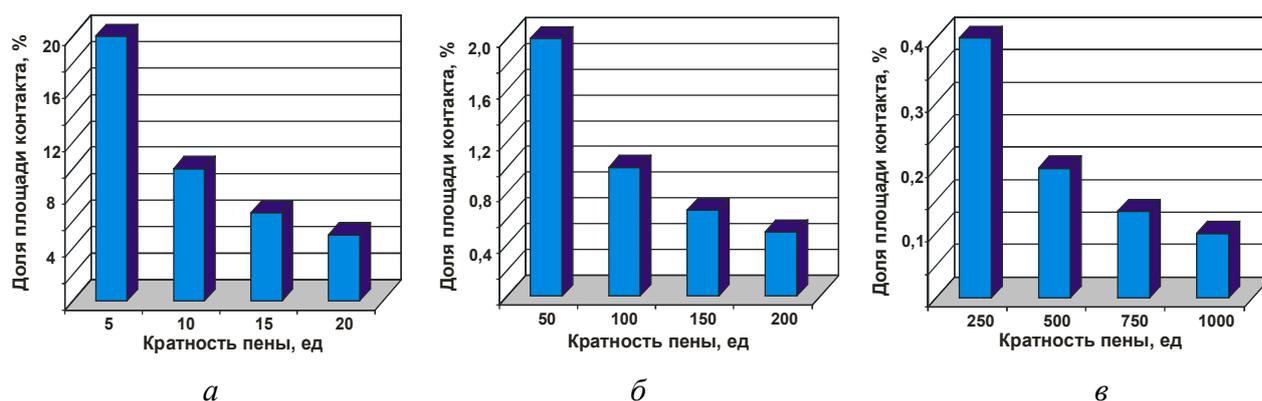


Рисунок 1.9 – Влияние кратности пены на долю площади контакта с поверхностью криогенной жидкости

a – для пен низкой кратности; *б* – для пен средней кратности; *в* – для пен высокой кратности

На Рисунке 1.10 представлена диаграмма, характеризующая

интенсификацию газообразования сжиженного природного газа, пролитого на поверхность бетона при контакте с пеной различной кратности. Из диаграммы видно, что подача воздушно-механической пены на поверхность сжиженного природного газа может привести к двукратному увеличению испарения. При этом такое бурное газообразование будет происходить только при использовании пены низкой кратности. Применение пены, кратностью более 100 единиц, увеличит скорость газообразования сжиженного природного газа всего на десятые доли процента.

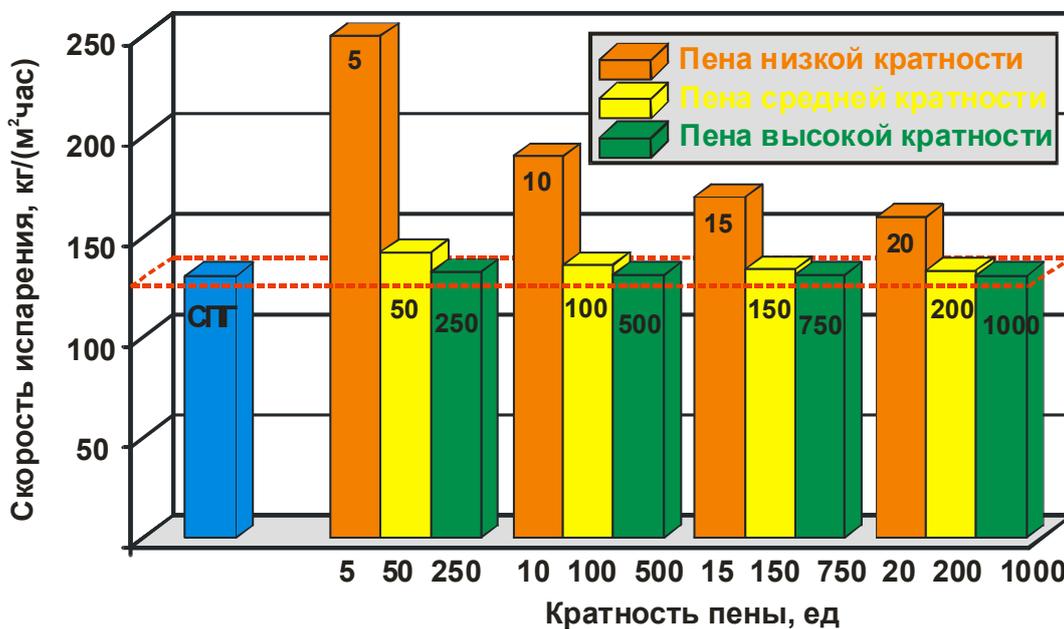


Рисунок 1.10 – Интенсификация газообразования сжиженного природного газа пролитого на поверхность бетона при контакте с пеной различной кратности

Поэтому, при выборе пены средней и высокой кратности, следует опираться не на увеличение скорости газообразования от контакта, а на возможность создания требуемой толщины пенного слоя.

Сжиженный метан и сжиженная пропан-бутановая смесь имеют разную температуру кипения и интенсивность испарения, а их пары разную плотность, поэтому основные параметры пенного тушения СУГ и СПГ должны быть разными. И здесь мы опять возвращаемся к вопросу об отсутствии конкретных данных для оценки возможности применения пены для тушения именно СПГ.

Высокократная воздушно-механическая пена широко применяется на

промышленных объектах с оборотом СПГ. Суть противопожарных мероприятий на таких объектах заключается в предотвращении каскадного сценария развития аварии в результате пролива СПГ при разгерметизации технологического оборудования или резервуара. Для предотвращения растекания СПГ предусматриваются бассейны-отстойники. Глубина бассейна рассчитывается таким образом, чтобы при самом неблагоприятном сценарии развития аварии, в заполненном бассейне оставался свободный борт высотой не менее 1,5 м. В случае воспламенения СПГ в бассейне, его покрывают слоем пены. При интенсивностях от 0,16 до 0,2 кг/(м²·с) подача производится циклами с перерывами в 30 с [17].

Для определения параметров тушения СПГ высокократной пеной требуется методика, позволяющая получить широкий массив экспериментальных данных. Зарубежные методики не позволяют этого сделать по причине их масштабности и дороговизны проведения испытаний. Помимо соответствующей инфраструктуры и специализированных пеногенераторов, для одного эксперимента требуется от 20 до 40 тонн СПГ. В связи с этим требуется провести анализ экспериментальных методик определения огнетушащей эффективности высокократной пены для выявления возможности применения для тушения СПГ.

В п.5.7 ГОСТ Р 50588-2012 [145] описана методика определения огнетушащей эффективности ВКП для тушения горючих жидкостей. Сущность методики заключается в определении времени тушения н-гептана в противне пеной высокой кратности при установленной интенсивности подачи рабочего раствора. Для получения ВКП готовят 100 дм³ рабочего раствора испытуемого пенообразователя. Устанавливают противень на ровной поверхности земли внутри экрана для сбора пены. Заливают в противень (30 ± 1) дм³ воды и (55 ± 1) дм³ н-гептана. Располагают генератор на расстоянии (7,5 ± 2,5) м от противня на тележке такой высоты, чтобы ось пеногенератора была на (0,65 ± 0,05) м выше поверхности земли (Рисунок 1.11). Проверяют работоспособность установки.

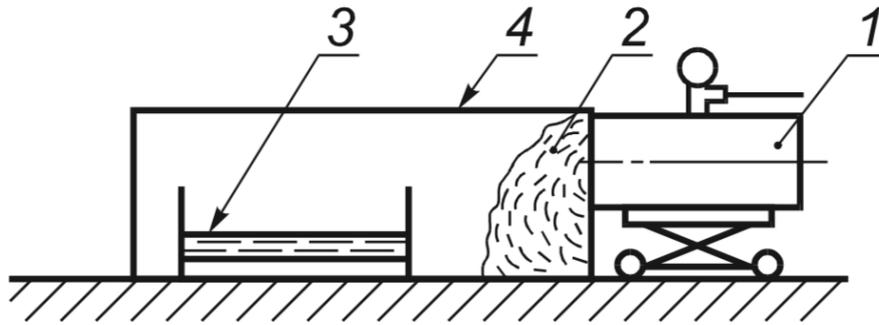


Рисунок 1.11 – Схема установки для определения времени тушения н-гептана при помощи ВКП

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

Горючее в противне зажигают. Время свободного горения составляет (60 ± 5) с. Включают насос. Генератор пены высокой кратности подводят к противню на расстояние $(1,0 \pm 0,1)$ м. Подачу пены из генератора осуществляют в течение (120 ± 2) с, даже если тушение наступило раньше. Фиксируют время с момента начала подачи пены до момента прекращения горения. Проводят три параллельных определения. При успешном тушении в первых двух определениях третье не проводят. За результат испытания принимают среднеарифметическое результатов двух успешных параллельных определений времени тушения. Допустимое расхождение между результатами параллельных определений с доверительной вероятностью 0,95 должно быть не более 20 % от среднего значения. В случае получения отрицательного результата в двух определениях из трех результат испытания считают отрицательным.

Отличительной положительной особенностью данной методики является то, что генератор высокократной пены имеет вентилятор, позволяющий регулировать кратность путем изменения частоты оборотов вентилятора. В стационарном режиме при частоте вращения вентилятора 23 оборота в секунду, скорость движения воздуха составит 5,9 м/с. Щит управления частотой вентилятора позволяет регулировать обороты в диапазоне от 2 до 40 оборотов в секунду. Недостатком методики является ограничение интенсивности подачи пены в узком

диапазоне от 0,030 до 0,034 кг/(м²·с). Однако для регулирования интенсивности подачи пены в широком диапазоне интенсивностей возможно применить способ, описанный в п.5.4 ГОСТ Р 50588-1993, где для определения критической интенсивности подачи пены используются модельные очаги различного диаметра [145, 146].

Методику определения времени тушения н-гептана при заданной интенсивности подачи пены в соответствии с требованиями п.5.7 ГОСТ Р 50588 целесообразно принять за основу для создания методики оценки параметров ВКП для тушения пролива СПГ.

Выводы по первой главе

1. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации, до 2035 г. приоритетным направлением нефтегазовой отрасли является развитие инфраструктуры производства, транспортировки и потребления сжиженного природного газа. В 2021 г. утверждена долгосрочная программа производства, включающая план мероприятий по реализации развития крупнотоннажного и малотоннажного производства. В связи с широким распространением объектов СПГ возникает проблема обеспечения их пожарной безопасности.

2. Пожары на объектах хранения и переработки СПГ случаются ежегодно. Наиболее крупные из них приводят к большому материальному ущербу и существенно осложняют ситуацию с поставками СПГ на рынок. Неблагоприятным сценарием развития пожара является разгерметизация технологического оборудования и пролив СПГ с последующим пламенным горением. Высокая интенсивность теплового излучения представляет угрозу каскадного развития аварии.

3. Одним из известных вариантов борьбы с пожарами на объектах СПГ является применение ВКП. При этом, 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.

4. Методики нормативных документов, используемые за рубежом, основаны на реализации варианта локализации, при котором происходит не тушение, а десятикратное снижение интенсивности теплового потока от горящего пролива СПГ, при этом для ликвидации пламенного горения допускается дополнительно применять огнетушащие порошки. Проведено большое количество экспериментов по определению влияния пенного слоя ВКП, как на изменение теплового потока, так и на изменение температуры над горящим проливом СПГ.

5. На 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 для проведения собственных экспериментальных исследований целесообразно использовать СПГ марки А по ГОСТ 34894-2022.

6. В отечественной литературе отсутствуют данные о методиках и результатах экспериментальных исследований по тушению проливов 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.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ВЫСОКОКРАТНОЙ ПЕНОЙ

2.1 Вещества и оборудование, используемые в работе

Для проведения натуральных экспериментов применялись следующие вещества:

- питьевая вода с удельной электропроводностью не более 0,1 См/м по ГОСТ Р 50588-2012 (далее – вода питьевая) [145, 147];
- сжиженный природный газ марки А по ГОСТ 34894-2022 [81];
- азот сжиженный по ГОСТ 9293 – 74 (ИСО 2435-73) [148] (далее – азот);
- пенообразователь типа S по ГОСТ 50588-2012 [145, 149] (далее – пенообразователь).

Показатели качества используемого пенообразователя представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Показатели качества используемого пенообразователя

Наименование показателя	Значение
Внешний вид	Однородная жидкость без осадка и расслоения
Плотность при 20 °С, кг/см ³	1090
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² ×с ⁻¹ ,	37
Температура застывания ПО с концентрацией рабочего раствора, °С	Минус 5
Водородный показатель рН пенообразователя	7,5
Кратность пены: низкая; средняя; высокая;	16 83 487

Продолжение таблицы 2.1

Наименование показателя	Значение
Устойчивость пены, с: низкая; средняя; высокая;	265 330 210
Время тушения н-гептана пеной средней кратности при интенсивности подачи рабочего раствора ($0,032 \pm 0,002$) $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (стендовая методика), с	75
Время тушения н-гептана пеной средней кратности при интенсивности подачи рабочего раствора ($0,032 \pm 0,002$) $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, с	121
Поверхностное натяжение рабочего раствора, мН/м	25,2
Показатель смачивающей способности, с	37

Для выполнения исследований применялось следующее оборудование:

- генератор высокократной пены (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, с массовым расходом 0,10 – 0,15 кг/с при давлении на ГВКП ($0,50 \pm 0,01$) МПа;
- защитный экран для сбора пены, предотвращающий растекание пены и способствующий ее накоплению, изготовленный из сетки (диаметр проволоки сетки 1,5 мм, размер стороны ячейки сетки в свету 8,0 мм), длина защитного экрана 1,5 метра, высота защитного экрана 1,05 метра, ширина защитного экрана 1,5 метра (на вертикальных металлических стойках экрана через каждые 100 мм нанесены отметки для визуальной оценки толщины пенного слоя во время тушения);
- рукав пожарный напорный диаметром 51 мм;
- емкость мерная со смотровым окошком уровня, для приготовления рабочего раствора пенообразователя вместимостью 100 дм^3 ;
- манометр водяной с верхним пределом измерений рабочего давления 1,00 МПа, с ценой деления 0,02 МПа, установленный на генераторе ВКП;
- сосуды Дьюара объемом 25, 35 и 50 литров, установленные на передвижных

опорно-поворотных устройствах;

–набор противней круглых, металлических, изготовленных из нержавеющей стали высотой борта 600 мм, толщиной стенки 2,50 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».

2.2 Методика определения параметров тушения сжиженного природного газа при помощи высокократной пены

Для определения параметров тушения пролива СПГ с использованием ВКП разработана методика с использованием экспериментальной установки, схема которой представлена на Рисунке 2.1.

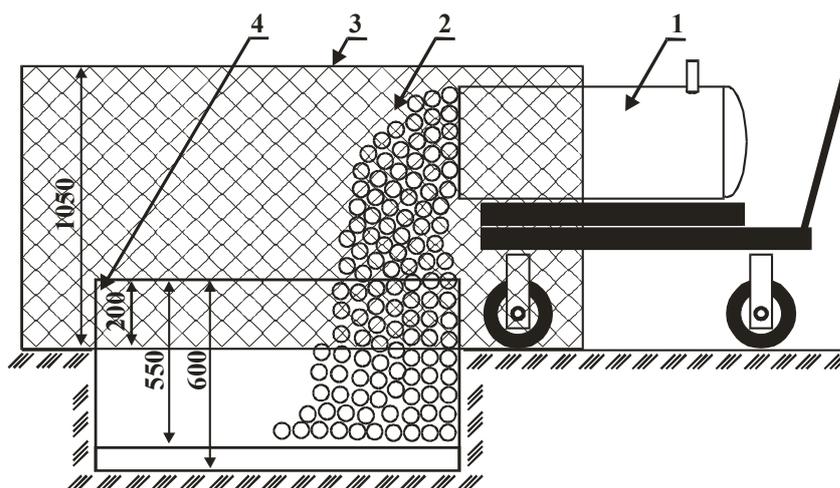


Рисунок 2.1 – Экспериментальная установка для определения параметров тушения СПГ при помощи ВКП

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

За основу принята методика и испытательное оборудование в соответствии с требованиями национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 50588-2012 [145] с доработанной конструкцией противней модельных очагов. Сущность методики заключается в определении времени тушения СПГ в противне пеной высокой кратности при заданной интенсивности подачи рабочего раствора и определении толщины пенного слоя после ликвидации пламенного горения.

Доставка СПГ к противню осуществляется в сосудах Дьюара объемом 25, 35 и 50 литров, установленных на передвижных опорно-поворотных устройствах (Рисунок 2.2 б). Перед наливом СПГ сосуды Дьюара должны быть предварительно охлаждены сжиженным азотом (Рисунок 2.2 в, г). Заполнение сосудов Дьюара СПГ производится из автомобильного криогенного топливного бака, объемом 1 м³ (Рисунок 2.2 а). Переливной клапан криогенного бака заменяется на патрубок с аналогичной резьбой. К патрубку присоединяется наливочное устройство, представляющее из себя теплоизолированный рукав длиной 1,5 м с трубкой длиной 0,5 м. Перед открытием крана трубка помещается в горловину сосуда Дьюара. Производится полное заполнение сжиженным газом одного или двух сосудов Дьюара (Рисунок 2.2 д). После заполнения каждый сосуд закрывается крышкой-вставкой. Затем производится перевозка заполненных сосудов Дьюара к модельному очагу (Рисунок 2.2 е).

Перед проведением каждой серии экспериментов по тушению, выполняется одно определение времени свободного горения СПГ в противне соответствующего диаметра. До заливки СПГ противень предварительно охлаждается жидким азотом из расчета 50 ± 5 литров сжиженного азота на 1 м² противня. Это позволяет снизить активное испарение СПГ до его поджога. В течение 30 с после прекращения испарения азота в противень заливается сжиженный природный газ из расчета 50 ± 5 литров СПГ на 1 м² противня. Поджиг модельного очага выполняется в течение 30 с после залива СПГ. Измеряется время с момента воспламенения СПГ до момента прекращения пламенного горения.

*а**б**в**г**д**е*

Рисунок 2.2 – Доставка СПГ к месту проведения испытаний

а – автомобильный криогенный топливный бак;

б – сосуд Дьюара со сжиженным азотом и сосуд Дьюара для СПГ;

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.

Испытания по тушению СПГ при помощи ВКП проводятся на открытом воздухе. Температура воздуха 10 °С – 22 °С. Перед каждым определением осуществляется контроль температуры раствора пенообразователя, которая должна составлять $(17,5 \pm 2,5)$ °С. Приготавливается 100 дм³ рабочего раствора пенообразователя. Противень закапывается в гравий на глубину 400 мм. Выполняется предварительная проверка работоспособности установки. Для этого определяется массовый расход рабочего раствора пенообразователя и кратность

пены в соответствии с п.5.3 ГОСТ Р 50588-2012 [145]. Фиксируются напорно-расходные характеристики подачи ВКП. Подача рабочего раствора прекращается. ГВКП откатывается на расстояние $(7,5 \pm 2,5)$ м от противня. Противень охлаждается жидким азотом из расчета 50 ± 5 литров сжиженного азота на 1 м^2 противня. В течение 30 с после прекращения испарения азота в противень заливается сжиженный природный газ из расчета 50 ± 5 литров СПГ на 1 м^2 противня (Рисунок 2.3 а). Этого количества СПГ ориентировочно хватает на $5 \pm 0,5$ мин. свободного горения. Возобновляется пенообразование на ГВКП с напорно-расходными характеристиками подачи ВКП, зафиксированными во время предварительной проверки работоспособности установки. Поджиг выполняется сразу после залива СПГ (Рисунок 2.3 б). Работающий ГВКП подводится к краю горящего противня. Производится подача пены (Рисунок 2.3 в). Время с момента поджога до момента начала подачи пены должно составлять не более 20 с. Фиксируется время от момента начала подачи пены до момента ликвидации пламенного горения. Прекращение подачи пены выполняется в течение 10 с после тушения (Рисунок 2.3 г).



а



б



в



г

Рисунок 2.3 – Тушение сжиженного природного газа высокократной пеной
 а – залив СПГ в противень; б – поджиг СПГ в противне;
 в – подача пены на поверхность горящего СПГ в противне;
 г – ликвидация пламенного горения СПГ

Металлической линейкой, установленной в центре модельного очага перпендикулярно его основания, определяется толщина пенного слоя. Проводится пять параллельных определений. При успешном тушении в трех определениях последующие тушения не проводятся. Успешным считается определение, при котором прекращение пламенного горения происходит в течение 250 с от 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 отрицательного результата в трех определениях из пяти результат испытания считали отрицательным.

2.3 Проведение экспериментальных исследований по определению основных параметров тушения сжиженного природного газа высократной пеной

2.3.1 Определение интенсивности выгорания сжиженного природного газа при свободном горении в противнях различного диаметра

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 800 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 10 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,1 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 25 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от

0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 4 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 305 с.

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 850 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 12 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,1 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 35 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3,5 до 4,5 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 368 с.

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы,

изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 900 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 4,1 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 35 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3,5 до 4 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 330 с.

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 970 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 4,0 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 35 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно

размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 4 до 4,5 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 284 с.

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 1050 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,0 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 50 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3,5 до 4,5 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 345 с.

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 1150 мм проведено одно испытание. Противень, закопали

в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,0 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 50 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 7 – 8 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3,5 до 5,5 метров (Рисунок 2.4). Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 288 с.



Рисунок 2.4 – Свободное горение СПГ в противне диаметром 1150 мм

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 1270 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,0 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 70 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 70 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 7 – 8 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 4,5 до 5 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 331 с.

Для определения интенсивности выгорания СПГ в противне круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренним диаметром 1390 мм проведено одно испытание. Противень, закопали в гравий на глубину 400 мм. Во время проведения экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,0 м/с. Противень охладили сжиженным азотом в количестве 75 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 75 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако

двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 7 – 8 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 4 до 5 метров. Время с момента воспламенения до момента прекращения пламенного горения составило 296 с. Таким образом, установлено, что ориентировочное время выгорания СПГ в модельных противнях при свободном горении находится в диапазоне от 284 до 368 с. Ориентировочная интенсивность выгорания СПГ находится в диапазоне от 0,16 л/(м²·с) до 0,17 л/(м²·с).

2.3.2 Определение параметров тушения сжиженного природного газа пеной кратностью от 200 до 550 единиц при фиксированной интенсивности подачи.

Для определения диапазона кратностей, в котором возможна ликвидация пламенного горения СПГ при помощи ВКП проведены эксперименты при фиксированной интенсивности подачи пены $0,2 \pm 0,01$ кг/(м²·с), которая на 25 % превышает максимально рекомендуемую при проведении испытаний в соответствии с требованиями стандарта DIN EN 12065 [121]. Для этого проведены эксперименты с использованием пены кратностью 200, 250, 400, 500 и 550 единиц.

Первая серия экспериментов проведена при интенсивности подачи пены $0,2 \pm 0,01$ кг/(м²·с) и кратности 200 ± 10 единиц. Серия состояла из четырех экспериментальных исследований. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным

из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,5 мм, внутренними диаметрами: 800 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,7 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 200 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 203 единицы. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 1,0 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 5 – 6 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 2 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 1,5 – 2 метров над

поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 20 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 54 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,73 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,1 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,210 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 202 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Спустя 60 секунд после начала подачи, накопления требуемого количества пены для тушения не наблюдалось. Спустя 286 секунд с момента поджига горение прекратилось. При помощи факела сделана попытка произвести повторный поджиг. Воспламенения не последовало. Таким образом, произошло прекращение пламенного горения в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной

скоростью вблизи противня 2,3 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 198 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Спустя 60 секунд после начала подачи, накопления требуемого количества пены для тушения не наблюдалось. Спустя 294 секунды с момента поджига горение прекратилось. При помощи факела сделана попытка произвести повторный поджиг. Воспламенения не последовало. Таким образом, произошло прекращение пламенного горения в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,3 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 190 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Спустя 60 секунд после начала подачи, накопления требуемого количества пены для тушения не наблюдалось. Спустя 291 секунду с момента поджига горение прекратилось. При помощи факела сделана попытка произвести повторный поджиг. Воспламенения не последовало. Таким образом, произошло прекращение пламенного горения в результате выгорания СПГ в противне.

Вторая серия экспериментов проведена при интенсивности подачи пены $0,2 \pm 0,01$ кг/(м²·с) и кратности 250 ± 10 единиц. Серия состояла из трех

экспериментальных исследований. Все три исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,5 мм, внутренними диаметрами: 800 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 10 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,1 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 250 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 241 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 2,5 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. После

снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 20 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 43 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,02 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,1 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,199 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 4 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 10 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,5 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 242 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 33 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,15 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,207 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 11 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,8 м/с. Температура рабочего раствора

пенообразователя составляла 14,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 243 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосудов Дьюара объемом 25 литров. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 37 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,1 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,205 кг/(м²·с).

Третья серия экспериментов проведена при интенсивности подачи пены 0,2±0,01 кг/(м²·с) и кратности 400±10 единиц. Серия состояла из трех экспериментальных исследований. Все три исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,5 мм, внутренними диаметрами: 800 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,7 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 400 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 398 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 1,0 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра,

во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 5 – 6 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 2 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 1,5 – 2 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 20 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 40 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,41 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,201 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной

скоростью вблизи противня 1,5 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 393 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 38 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,44 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,200 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 391 единицу. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 37 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,50 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,190 кг/(м²·с).

Четвертая серия экспериментов проведена при интенсивности подачи пены 0,2±0,01 кг/(м²·с) и кратности 500±10 единиц. Серия состояла из четырех экспериментальных исследований. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,5 мм, внутренними

диаметрами: 800 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 10 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,7 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 500 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 490 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 2 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 1 – 2 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся

на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. При достижении толщины пенного слоя 1,5 м пена начинает переваливаться за край экрана. Через 46 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,68 м. Расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,199 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3,5 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 11 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 0,6 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 492 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. При достижении толщины пенного слоя 1,5 м пена начинает переваливаться за край экрана. Через 41 секунду с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,75 м. Расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,203 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 11 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 4,5 м/с. Температура рабочего раствора

пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 493 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 289 секунд после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 10 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 491 единица. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. При достижении толщины пенного слоя 1,5 м пена начинает переваливаться за край экрана. Через 37 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,71 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,205 кг/(м²·с).

Пятая серия экспериментов проведена при интенсивности подачи пены 0,2±0,01 кг/(м²·с) и кратности 550±10 единиц. Серия состояла из пяти экспериментальных исследований. Все пять исследований выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из

нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,5 мм, внутренними диаметрами: 800 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Скорость ветра вблизи противня достигала 1,2 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 550 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 544 единицы. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 1,0 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 4 – 5 метров не наблюдалась. Факел подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 2,5 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Спустя 60 секунд после начала подачи, несмотря на визуальное накопление слоя пены, тушения не наблюдалось. Спустя 297 секунд с момента поджига горение прекратилось. При помощи факела сделана попытка произвести повторный поджиг. Воспламенения

не последовало. Таким образом, произошло прекращение пламенного горения в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Скорость ветра вблизи противня достигала 1,0 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 546 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Спустя 60 секунд после начала подачи, несмотря на визуальное накопление слоя пены, тушения не наблюдалось. Спустя 302 секунд с момента поджига горение прекратилось. При помощи факела сделана попытка произвести повторный поджиг. Воспламенения не последовало. Таким образом, произошло прекращение пламенного горения в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,0 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 542 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. При достижении толщины пенного слоя 1,5 м пена начинает переваливаться за край экрана. Через 137 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,60 м. Расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность

подачи пены составила $0,196 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла $16 \text{ }^\circ\text{C}$. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня $1,4 \text{ м/с}$. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,100 \text{ л/с}$ составила 558 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л . Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. При достижении толщины пенного слоя $1,5 \text{ м}$ пена начинает переваливаться за край экрана. Через 138 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила $1,64 \text{ м}$. Расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил $0,104 \text{ л/с}$, интенсивность подачи пены составила $0,209 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Во время проведения пятого экспериментального исследования температура воздуха составляла $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость ветра вблизи противня достигала $1,1 \text{ м/с}$. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,100 \text{ л/с}$ составила 549 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л . Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Спустя 300 секунд с момента поджига горение прекратилось. При помощи факела сделана попытка произвести повторный поджиг. Воспламенения не последовало. Таким образом, произошло прекращение пламенного горения в результате выгорания СПГ в противне.

2.3.3 Определение параметров тушения сжиженного природного газа пеной кратностью 250 единиц при различной интенсивности подачи

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250 ± 10 единиц с интенсивностью подачи $0,18 \pm 0,01$ кг/(м²·с) сделано четыре экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 850 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 12 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,5 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 250 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,1 л/с составила 244 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с

наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 1,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 20 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 43 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,84 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,1 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,176 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 4 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 10°С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,4 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 244 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания

центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 38 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,9 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,183 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 12 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 6 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 245 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 291 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 12 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,3 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 245 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены.

Через 37 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,88 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,182 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250±10 единиц с интенсивностью подачи 0,16±0,01 кг/(м²·с) сделано три экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 900 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 12 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,2 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 250 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 245 единиц. Противень охладил сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с

наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 4 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 41 секунду с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,73 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,159 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 4 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 13°С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,2 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 247 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры

электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 38 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,76 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,160 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 12 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 0,9 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 245 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 35 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,8 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,162 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250±10 единиц с интенсивностью подачи 0,139±0,01 кг/(м²·с) сделано три экспериментальных исследования. Все три исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 970 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм.

Во время проведения первого экспериментального исследования

температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,5 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 14 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 250 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 248 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 34 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось.

Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,7 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,139 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 4 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,5 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 249 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 37 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,73 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,141 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,9 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 248 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания

центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 44 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,67 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,138 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250±10 единиц с интенсивностью подачи 0,119±0,01 кг/(м²·с) сделано три экспериментальных исследования. Все три исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1050 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдалось возникновение порывов ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,2 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 250 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 250 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджиг был

выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 47 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,66 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,119 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 4 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 17°С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,2 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 251 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания

центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 53 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,66 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,119 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,9 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 250 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 60 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,7 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,120 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250±10 единиц с интенсивностью подачи 0,1±0,01 кг/(м²·с) сделано четыре экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1150 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,3 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя

составляла $17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002\text{ л/с}$ и кратности пены 250 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,103\text{ л/с}$ составила 254 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 72 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,63 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил $0,103\text{ л/с}$, интенсивность

подачи пены составила $0,099 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3,5 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 16°C . Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня $1,4 \text{ м}/\text{с}$. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17°C . Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,104 \text{ л}/\text{с}$ составила 254 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 81 секунду с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила $0,64 \text{ м}$, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил $0,104 \text{ л}/\text{с}$, интенсивность подачи пены составила $0,1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 18°C . Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня $1,8 \text{ м}/\text{с}$. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла $17,5^\circ\text{C}$. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,103 \text{ л}/\text{с}$ составила 255 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 304 с после начала подачи

ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 18 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,8 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 253 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 88 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,65 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,1 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250±10 единиц с интенсивностью подачи 0,08±0,01 кг/(м²·с) сделано четыре экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1270 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 19 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 250 ±

10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 257 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. Сжиженный азот в количестве 70 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом по 35 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ в количестве 70 л из двух сосудов Дьюара объемом по 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3,5 до 5,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 152 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,62 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,08 кг/(м²·с). После прекращения горения

установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось еще в течение 3 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 18 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,3 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,1 л/с составила 258 единиц. Сжиженный азот в количестве 70 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом по 35 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 171 секунду с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,61 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,100 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,079 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 18 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 4,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,1 л/с составила 259 единиц. Сжиженный азот в количестве 70 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом по 35 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. подача пены продолжалась в течение 250 с. подачу ВКП прекратили. Горение продолжалось в течение минуты после прекращения подачи пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены и отдельными языками пламени. Во время подачи ВКП ликвидации пламенного горения не произошло.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 18 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,2 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 258 единиц. Сжиженный азот в количестве 70 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом по 35 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 156 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 0,64 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,81 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 250±10 единиц с интенсивностью подачи 0,06±0,01 кг/(м²·с) сделано три экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1390 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 250 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 255 единиц. Противень охладил

сжиженным азотом. Сжиженный азот в количестве 75 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом 25 и 50 л. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ в количестве 70 л из двух сосудов Дьюара объемом 25 и 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых двадцати секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Прекращение пламенного горения произошло через 281 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,8 м/с. Температура рабочего раствора

пенообразователя составляла $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,1\text{ л/с}$ составила 256 единиц. Сжиженный азот в количестве 75 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом 25 и 50 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Прекращение пламенного горения произошло через 298 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня $1,4\text{ м/с}$. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя $0,1\text{ л/с}$ составила 257 единиц. Сжиженный азот в количестве 75 л наливался в модельный очаг из двух сосудов Дьюара объемом 25 и 50 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Прекращение пламенного горения произошло через 307 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

2.3.4 Определение параметров тушения сжиженного природного газа пеной кратностью 500 единиц при различной интенсивности подачи

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500 ± 10 единиц с интенсивностью подачи $0,18\pm 0,01\text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ сделано три экспериментальных исследования. Все три исследования выполнены в один день. При проведении

исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 850 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 13 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,3 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 500 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 493 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 4 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило

слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 1,5 – 2,0 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. При достижении толщины пенного слоя 1,5 м пена начинает переваливаться за край экрана. Через 44 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,61 м. Расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,182 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 4 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 13°С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 0,8 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 496 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 37 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,53 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,180 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования

температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 491 единица. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 38 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,51 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,178 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500±10 единиц с интенсивностью подачи 0,16±0,01 кг/(м²·с) сделано четыре экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 900 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,4 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 500 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 500 единиц. Противень охладил сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л.

Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 4 до 4,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 46 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,4 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,159 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 13 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,30 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 496 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 40 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,41 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,101 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,159 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались сильные порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,8 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,1 л/с составила 500 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 294 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 14 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,5 м/с. Температура рабочего раствора

пенообразователя составляла 17 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 497 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 39 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,54 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,162 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500±10 единиц с интенсивностью подачи 0,139±0,01 кг/(м²·с) сделано пять экспериментальных исследований. Все пять исследований выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 970 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,3 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 500 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 505 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра,

во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 2 – 2,5 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 50 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,43 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,139 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3,5 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной

скоростью вблизи противня 2,9 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 499 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 305 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались сильные порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 5,5 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 501 единица. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 300 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,2 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего

раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 502 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 48 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,45 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,141 кг/(м²·с).

Во время проведения пятого экспериментального исследования температура воздуха составляла 15 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,6 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,102 л/с составила 500 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 35 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 55 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,38 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,102 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,138 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500±10 единиц с интенсивностью подачи 0,119±0,01 кг/(м²·с) сделано четыре экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1050

мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,1 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 500 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 505 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,8 до 1,8 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 4 – 6 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 4 до 5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 303 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджог. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,4 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 19 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 505 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 78 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,35 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,119 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 19 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 505 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 66 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,42 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,119 кг/(м²·с).

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались слабые порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 0,8 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 504 единицы. После визуального

прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 61 секунду с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,44 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,12 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500±10 единиц с интенсивностью подачи 0,099±0,01 кг/(м²·с) сделано четыре экспериментальных исследования. Все четыре исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1150 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 20 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,5 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 500 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 508 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,5 до 1,5 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно

размазывалась и уже через 6 – 7 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с наветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. В течение первых десяти секунд подачи происходило слабое снижение высоты пламени, испарение сжиженного природного газа визуально не наблюдалось. После снижения высоты пламени до 1,5 – 2 метров над поверхностью пены начинает визуализироваться граница пара, располагающаяся на высоте около 10 см от поверхности пены. Снижение интенсификации пламенного горения сопровождается пульсирующим выходом пара из слоя пены. Через 141 секунду с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Однако пульсирующий выход метана из пенного слоя продолжался. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,34 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,099 кг/(м²·с). После прекращения горения установку для подачи ВКП отвели от модельного противня на расстояние 10 м. Отключили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. При помощи факела произвели поджог метана, проходившего через слой ВКП. Горение продолжалось в течение 3 минут, при этом пенный слой разрушился в течение двух минут после повторного воспламенения СПГ.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 20°С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 19,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего

раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 508 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 117 секунд с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,46 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,103 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,099 кг/(м²·с).

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 19 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,0 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 506 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 301 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения четвертого экспериментального исследования температура воздуха составляла 19 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,1 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 18,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,104 л/с составила 502 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ из сосуда Дьюара объемом 50 л. Поджог был выполнен факелом с

подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Через 133 секунды с момента начала подачи ВКП пламенное горение прекратилось. Ориентировочная толщина пенного слоя составила 1,41 м, расход рабочего раствора пенообразователя во время тушения составил 0,104 л/с, интенсивность подачи пены составила 0,100 кг/(м²·с).

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500±10 единиц с интенсивностью подачи 0,080±0,01 кг/(м²·с) сделано три экспериментальных исследования. Все три исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1270 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,8 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора 0,102 ± 0,002 л/с и кратности пены 500 ± 10. Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 508 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ объемом 70 л. из двух сосудов Дьюара объемом 50 и 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ располагалась на высоте от 0,8 до 1,8 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 4 – 5 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной,

так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 2 до 4 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 291 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,4 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 16,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,1010 л/с составила 510 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ объемом 70 л. из двух сосудов Дьюара объемом 50 и 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 299 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались сильные порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 3,4 м/с. Температура рабочего раствора

пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,103 л/с составила 504 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ объемом 70 л. из двух сосудов Дьюара объемом 50 и 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 295 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Для определения времени тушения СПГ пеной кратностью 500 ± 10 единиц с интенсивностью подачи $0,066 \pm 0,01$ кг/(м²·с) сделано три экспериментальных исследования. Все три исследования выполнены в один день. При проведении исследований использовалась экспериментальная установка для подачи ВКП на поверхность СПГ с противнем круглой формы, изготовленным из нержавеющей стали высотой 600 мм, толщиной стенки 2,50 мм, внутренними диаметрами: 1390 мм. Противень, закопали гравий на глубину 400 мм. Снаружи противня установили экран для сбора пены.

Во время проведения первого экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 0,5 м/с. Для подачи ВКП приготовлено 100 л рабочего раствора пенообразователя. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Отрегулировали обороты вентилятора и давление на насосе для обеспечения расхода рабочего раствора $0,102 \pm 0,002$ л/с и кратности пены 500 ± 10 . Определили кратность пены. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,101 л/с составила 510 единиц. Противень охладили сжиженным азотом. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ объемом 75 л. из двух сосудов Дьюара объемом 50 и 25 л. Видимая верхняя граница паровоздушного облака СПГ

располагалась на высоте от 0,8 до 1,8 метров от поверхности земли. Облако двигалось по направлению ветра, во время порывов ветра верхняя граница паровоздушного облака снижалась. По направлению ветра визуальная граница паровоздушного облака постепенно размазывалась и уже через 4 – 5 метров не наблюдалась. Факел постепенно подносился к краю противня с как подветренной, так и с наветренной стороны для поиска места, где концентрация паров метана находится в пределах концентрационных пределов воспламенения. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Образовавшееся пламя имело оранжевый цвет, свидетельствующий о горении богатой паровоздушной смеси. При этом образования сажи и копоти не наблюдалось. Характер горения – пульсирующий, с изменением высоты пламени. Высота пламени менялась от 3 до 3,5 метров. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 302 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджог. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения второго экспериментального исследования температура воздуха составляла 17 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 1,6 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 17,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 500 единиц. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ объемом 75 л. из двух сосудов Дьюара объемом 50 и 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 291 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджог.

Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

Во время проведения третьего экспериментального исследования температура воздуха составляла 16 °С. Наблюдались порывы ветра с максимальной скоростью вблизи противня 2,0 м/с. Температура рабочего раствора пенообразователя составляла 15,5 °С. Кратность пены при расходе рабочего раствора пенообразователя 0,100 л/с составила 504 единицы. После визуального прекращения испарения сжиженного азота в противень наливался сжиженный природный газ объемом 75 л. из двух сосудов Дьюара объемом 50 и 25 л. Поджог был выполнен факелом с подветренной стороны. Одновременно с поджигом включили тумблеры электропитания центробежного насоса и вентилятора. Генератор пены высокой кратности подвели к краю противня. Началась подача пены для тушения. Прекращение пламенного горения произошло через 289 с после начала подачи ВКП. При помощи факела, сделана попытка произвести поджег. Воспламенение не произошло. Таким образом, прекращение пламенного горения произошло в результате выгорания СПГ в противне.

2.4 Обработка полученных экспериментальных данных

Произведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных времени тушения и толщины пенного слоя от интенсивности подачи пены. Для этого было выполнено: определение среднего арифметического значений всех измерений для соответствующей интенсивности, определение абсолютной погрешности, определение среднего квадратического отклонения, определение коэффициента Стьюдента измерений с доверительной вероятностью 0,95 из таблиц распределения Стьюдента, определение величины доверительного интервала истинного значения.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных времени

тушения СПГ и толщины пенного слоя от интенсивности подачи ВКП кратностью 250 ± 10 представлены в Таблице 2.2. Результаты обработки полученных экспериментальных данных времени тушения СПГ и толщины пенного слоя от интенсивности подачи ВКП кратностью 500 ± 10 представлены в Таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты обработки экспериментальных данных времени тушения СПГ от интенсивности подачи ВКП кратностью 250 ± 10 единиц

№ п/п	Диаметр противня, мм	Расход раствора (среднее значение), л/с	Интенсивность подачи пены (среднее значение), кг/(м ² ·с)	Толщина пенного слоя, м		Время тушения, с	
				среднее значение	доверит. интервал, (p=0,95)	среднее значение	доверит. интервал, (p=0,95)
1	800	0,102	0,204	1,05	0,076	37,7	12,5
2	850	0,102	0,180	0,87	0,076	39,3	9,84
3	900	0,102	0,160	0,76	0,087	38,0	7,45
4	970	0,103	0,139	0,7	0,074	38,3	12,70
5	1050	0,104	0,119	0,67	0,057	53,33	16,15
6	1150	0,104	0,100	0,64	0,025	80,3	19,91
7	1270	0,101	0,080	0,62	0,038	159,7	24,87

Таблица 2.3 – Результаты обработки экспериментальных данных времени тушения СПГ от интенсивности подачи ВКП кратностью 500 ± 10 единиц

№ п/п	Диаметр противня, мм	Расход раствора (среднее значение), л/с	Интенсивность подачи пены (среднее значение), кг/(м ² ·с)	Толщина пенного слоя, м		Время тушения, с	
				среднее значение	доверит. интервал, (p=0,95)	среднее значение	доверит. интервал, (p=0,95)
1	800	0,102	0,202	1,70	0,087	41,30	11,19
2	850	0,102	0,180	1,55	0,131	39,70	2,19
3	900	0,102	0,160	1,46	0,194	41,70	9,40
4	970	0,103	0,139	1,42	0,090	51,00	8,95
5	1050	0,104	0,119	1,40	0,117	68,33	21,69
6	1150	0,103	0,099	1,40	0,150	130,30	19,91

Выводы по второй главе

1. 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 в зависимости от интенсивности подачи ВКП.

2. 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.

3. 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 пролива дыма и копоти не наблюдается.

4. Тушение пролива СПГ при помощи ВКП связано с рядом последовательных событий включающих в себя: снижение высоты пламени; постепенный рост толщины пенного слоя; фрагментация 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; полная ликвидация пламенного горения; выход струй метана через пенный слой после ликвидации пламенного горения.

5. Наблюдения за процессом тушения СПГ при помощи ВКП показывают, что для ликвидации пламенного горения необходимо создать на поверхности горящего пролива 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.

6. На результативность применения ВКП для тушения СПГ существенно влияет скорость ветра. С ростом скорости ветра прекращение пламенного горения затрудняется. При увеличении кратности пены 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 ликвидация пламенного горения СПГ при помощи ВКП не происходит.

7. Расхождение между результатами трех параллельных определений с доверительной вероятностью 0,95 не превышает 35 % от среднего значения при условии отсутствия ветра, скорость которого превышает 3,1 м/с для ВКП кратностью 500 единиц и 3,8 м/с для ВКП кратностью 250 единиц.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Анализ результатов экспериментальных исследований по определению параметров тушения пожара пролива сжиженного природного газа высократной пеной

Для визуализации полученных результатов тушения СПГ при помощи ВКП и дальнейшего анализа экспериментальных данных на Рисунках 3.1 и 3.2 представлены зависимости времени тушения и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя от интенсивности подачи пены.

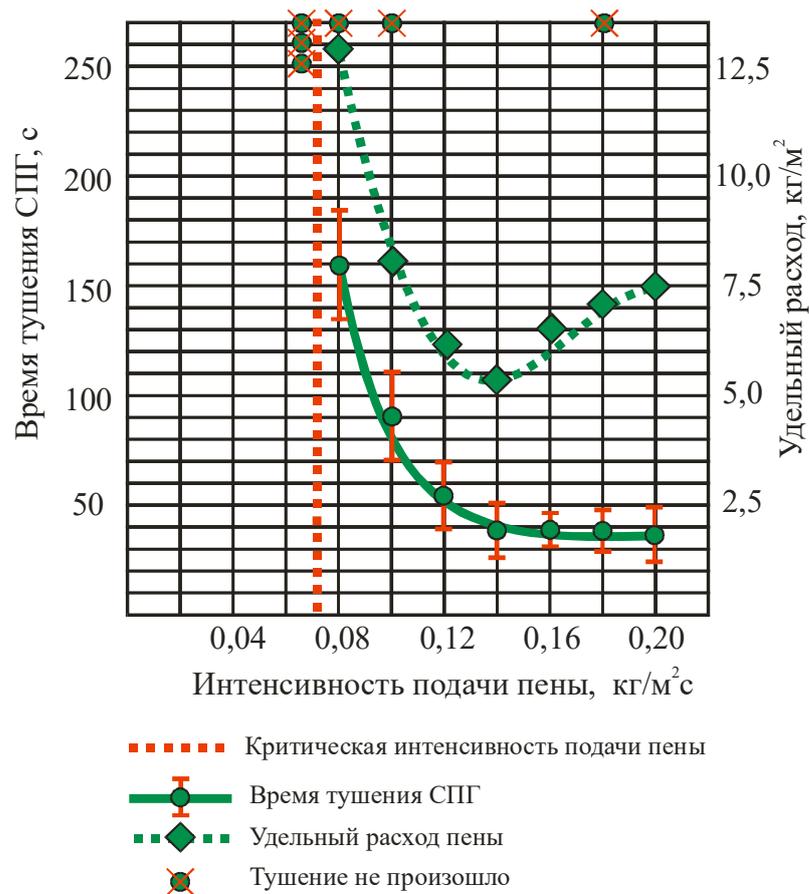


Рисунок 3.1 – Зависимость времени тушения СПГ и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя от интенсивности подачи пены кратностью 250 ± 10

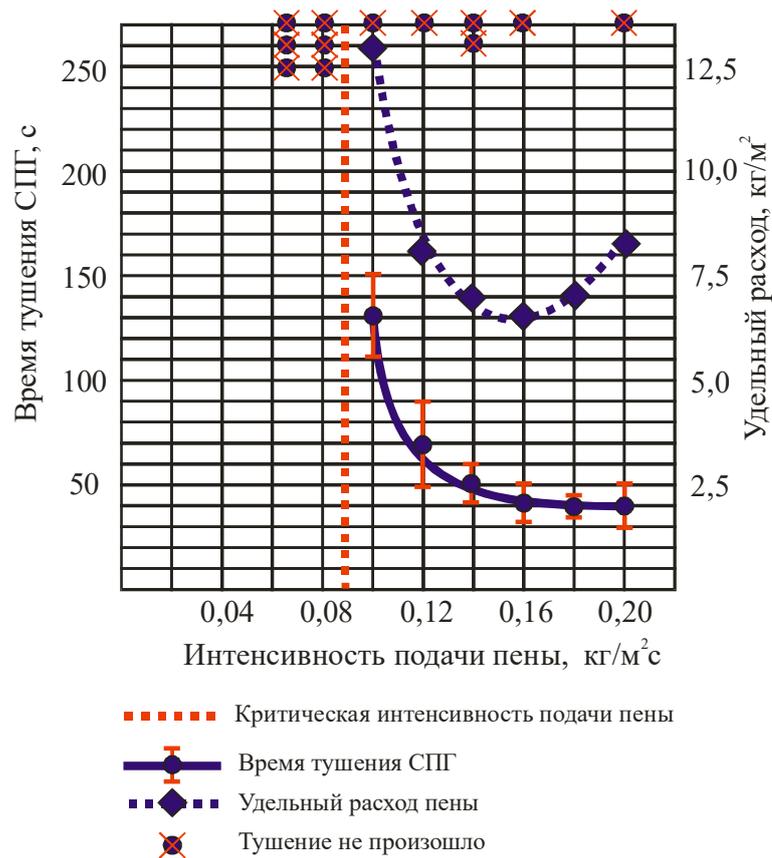


Рисунок 3.2 – Зависимость времени тушения СПГ и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя от интенсивности подачи пены кратностью 500 ± 10

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 до достижения оптимальной интенсивности подачи пены. Дальнейшее увеличение интенсивности подачи пены не существенно влияет на снижение времени тушения СПГ.

Для оценки параметров использования ВКП как для контролируемого выгорания, так и для тушения пролива СПГ требуется уточнение механизма ликвидации пламенного горения. Сжиженный природный газ является криогенной

горючей жидкостью с ориентировочной температурой кипения $-167\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате кипения СПГ образуется метан. При нагревании паров метана выше $-167\text{ }^{\circ}\text{C}$ он становится легче воздуха и поднимается. Поэтому СПГ – это постоянно кипящая горючая жидкость, над поверхностью которой образуется паровоздушное облако с концентрацией горючих паров выше верхнего концентрационного предела распространения пламени [150, 151]. После постепенного смешения горючих паров с кислородом воздуха происходит образование пожаровзрывоопасных концентраций. При горении СПГ образуется пламя высотой несколько метров. Такая высота пламени также обусловлена тем, что образовавшиеся пары метана легче воздуха.

Поданная пена является неоднородной дисперсной системой [152]. От контакта с криогенной жидкостью нижние слои пены, затвердевают с сохранением структуры. Однако этого слоя твердой пены недостаточно, чтобы остановить испарение со всей поверхности. Механизм предусматривает то, что прохождение холодного метана через пенный слой обуславливается его низкой молярной массой. Преграда свободному прохождению метана через пенный слой возникает в результате образования слоя замерзшей пены, контактирующей с СПГ. Однако появившийся нижний слой замерзшей пены не способен полностью предотвратить испарение, а поднимающийся метан образует в пенном слое полые ледяные фигуры, из вершин которых продолжается выход метана [33, 35, 153–156].

Выходящий из вершин полых ледяных фигур метан продолжает гореть, поэтому над поверхностью пенного слоя наблюдаются отдельные языки пламени (Рисунок 3.3 а, в). 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 снизится до температуры потухания и горение прекращается. После прекращения пламенного горения из вершин полых ледяных фигур продолжается выход газообразного метана (Рисунок 3.3 б, г).

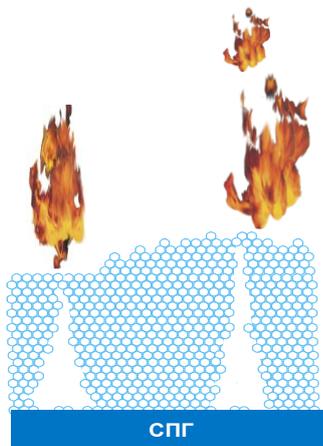
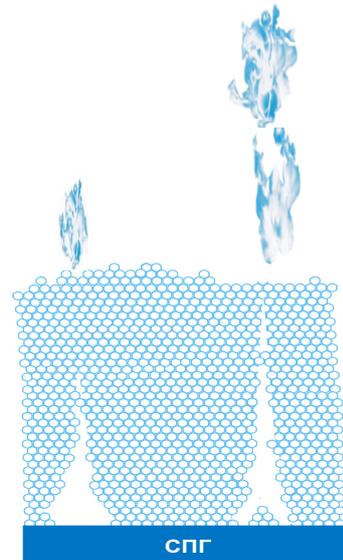
*a**б**в**г*

Рисунок 3.3 – Применение ВКП при тушении сжиженного природного газа
a, в – отдельные языки пламени во время подачи воздушно-механической пены;
б, г – выход метана из вершин полых ледяных фигур после тушения.

Обоснование предложенного механизма ликвидации пламенного горения пролива СПГ при помощи ВКП подтверждается сравнением результатов испытаний, выполненных в американском университете «Texas A&M University» [36] с анализом расчетов температуры потухания, выполненных по методике, предложенной Я.Б. Зельдовичем [92, 96, 97, 157]. Определим температуру потухания.

$$T_{\text{пот}}^{\text{действ}} = T_{\text{пот}}^{\text{ад}} \cdot 0,7 = \left(T_{\text{ад}} - \frac{3 \cdot R \cdot T_{\text{ад}}^2}{E_a} \right) \cdot 0,7 \quad (3.1)$$

где $T_{\text{пот}}^{\text{действ}}$ – действительная температура потухания;

$T_{\text{пот}}^{\text{ад}}$ – адиабатическая температура потухания;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура горения;

E_a – энергия активации.

Подставив в формулу (3.1) следующие значения физических величин:

$T_{\text{ад}} = 2210 \text{ К}$ [158], $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$, $E_a = 122 \text{ кДж}/\text{моль}$ [93], имеем:

$$T_{\text{пот}}^{\text{действ}} = \left(2210 - \frac{3 \cdot 8,314 \cdot 2210^2}{122000} \right) \cdot 0,7 = 848 \text{ К} (574,9^\circ\text{C}), \quad (3.2)$$

На Рисунке 3.4 представлена зависимость, позволяющая сравнить температуру над поверхностью горящего СПГ, покрытого слоем ВКП толщиной 1,4 м и кратностью 500 ед., с температурой над поверхностью свободно горящего СПГ.

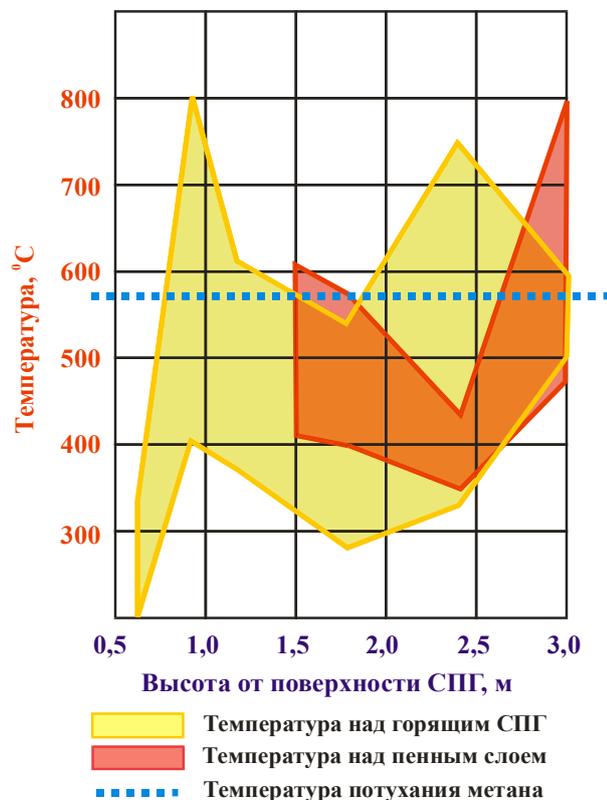


Рисунок 3.4 – Температура над поверхностью горящего СПГ покрытой слоем ВКП и свободно горящего СПГ на различной высоте

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, с помощью программного обеспечения MsExcel построены полиномиальные линии тренда методом наименьших квадратов на основе экспериментальных данных, изложенных в таблицах 2.2 и 2.3. Для выбора степени аппроксимирующих полиномов, установили критерий, при котором индекс множественной детерминации не ниже 0,98. Аппроксимирующий полином второй степени для ВКП кратностью 500 имеет индекс множественной детерминации 0,87. Аппроксимирующий полином второй степени для ВКП кратностью 250 имеет индекс множественной детерминации 0,96. Поэтому для математической обработки полученных экспериментальных данных выбраны аппроксимирующие полиномы третьей степени, имеющие индекс множественной детерминации более 0,98.

Для пены кратностью 500 ед. подобран аппроксимирующий полином третьей степени:

$$h = \frac{k_{\text{п}} \cdot J^3}{1,14 \cdot a} - \frac{k_{\text{п}} \cdot J^2}{3,38 \cdot a} + \frac{k_{\text{п}} \cdot J}{29,84 \cdot a} + \frac{k_{\text{п}}}{714,10 \cdot B}, \quad (3.3)$$

где h – толщина пенного слоя ВКП, м;

$K_{\text{п}}$ – кратность ВКП;

J – интенсивность подачи ВКП, кг/(м²·с);

a – коэффициент пропорциональности (равен единице), кг/(м³·с);

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

Для пены кратностью 250 ед. подобран аппроксимирующий полином третьей степени:

$$h = \frac{k_{\Pi} \cdot I^3}{0,99 \cdot a} - \frac{k_{\Pi} \cdot I^2}{3,72 \cdot a} + \frac{k_{\Pi} \cdot I}{38,36 \cdot a} + \frac{k_{\Pi}}{615,34 \cdot B}, \quad (3.4)$$

Для получения итоговой эмпирической зависимости для определения толщины пенного слоя от кратности и интенсивности подачи пены выполним усреднение двух аппроксимирующих полиномов с учетом их значимости [159]. Для выполнения дальнейших математических операций с полиномами и получения итоговой зависимости, введен параметр, отображающий условный вес каждого полинома в серии из всех испытаний. В нашем случае это отношение надежности каждой серии испытаний к суммарной надежности двух серий испытаний. Надежность рассчитывается как произведение доли успешных испытаний и количества всех испытаний в серии.

Обозначим, надежность серии испытаний для ВКП кратностью 500 ед. – R_1 , а надежность серии испытаний для ВКП кратностью 250 ед. – R_2 , тогда:

$$R_1 = \frac{(100 \% - P_1)}{100} \cdot n_1, \quad (3.5)$$

где P_1 – вероятность проведения неудачного испытания ВКП кратностью 500 ед.;

n_1 – количество испытаний в серии для ВКП кратностью 500 ед.;

$$R_2 = \frac{(100 \% - P_2)}{100} \cdot n_2, \quad (3.6)$$

где P_2 – вероятность проведения неудачного испытания ВКП кратностью 250 ед.;

n_2 – количество испытаний в серии для ВКП кратностью 250 ед.

Подставив в формулы (3.5) и (3.6) значение соответствующей доли неудачных испытаний и количество всех испытаний в серии ($P_1 = 40 \%$, $P_2 = 22 \%$, $n_1 = 30$ и $n_2 = 27$) получим:

$$R_1 = \frac{(100 \% - 40 \%)}{100} \cdot 30 = 18,00$$

$$R_2 = \frac{(100\% - 22\%)}{100} \cdot 27 = 21,06$$

Обозначим условный вес полинома в итоговой зависимости для ВКП кратностью 500 ед. как W_1 , и условный вес полинома в итоговой зависимости для ВКП кратностью 250 ед. как W_2 . Тогда:

$$W_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (3.7)$$

$$W_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (3.8)$$

Подставив полученные значения в формулы (3.7) и (3.8), получим:

$$W_1 = \frac{18}{18 + 21,06} = 0,461$$

$$W_2 = \frac{21,06}{18 + 21,06} = 0,539$$

Аппроксимирующий полином (3.3) для ВКП кратностью 500 ед. с учетом его условного веса в итоговой зависимости примет вид:

$$0,461 \cdot h = \frac{0,461 \cdot k_{\text{п}} \cdot J^3}{1,14 \cdot a} - \frac{0,461 \cdot k_{\text{п}} \cdot J^2}{3,38 \cdot a} + \frac{0,461 \cdot k_{\text{п}} \cdot J}{29,84 \cdot a} + \frac{0,461 \cdot k_{\text{п}}}{714,10 \cdot B}, \quad (3.9)$$

Аппроксимирующий полином (3.4) для ВКП кратностью 250 ед. с учетом его условного веса в итоговой зависимости примет вид:

$$0,539 \cdot h = \frac{0,539 \cdot k_{\text{п}} \cdot J^3}{0,99 \cdot a} - \frac{0,539 \cdot k_{\text{п}} \cdot J^2}{3,72 \cdot a} + \frac{0,539 \cdot k_{\text{п}} \cdot J}{38,36 \cdot a} + \frac{0,539 \cdot k_{\text{п}}}{615,34 \cdot B}, \quad (3.10)$$

Выполнив сложение полиномов (3.9) и (3.10) путем сложения соответствующих коэффициентов при каждом члене функции имеем:

$$h = \frac{k_{\text{п}} \cdot J^3}{1,06 \cdot a} - \frac{k_{\text{п}} \cdot J^2}{3,56 \cdot a} + \frac{k_{\text{п}} \cdot J}{34,21 \cdot a} + \frac{k_{\text{п}}}{655,56 \cdot B}, \quad (3.11)$$

После преобразования полинома (3.11) получим итоговую зависимость для расчета толщины пенного слоя в зависимости от кратности и интенсивности подачи ВКП:

$$h = \frac{k_{\Pi}}{a} \cdot \left(\frac{J^3}{1,06} - \frac{J^2}{3,56} + \frac{J}{34,21} \right) + \frac{k_{\Pi}}{655,56 \cdot B}, \quad (3.12)$$

На Рисунке 3.5 представлены зависимости, толщины пенного слоя, требуемой для ликвидации пламенного горения, от кратности и интенсивности подачи ВКП. Точками обозначены экспериментальные данные, сплошная и штрихпунктирная линии – результаты расчета по формуле 3.12. На участке интенсивности подачи ВКП до 0,16 кг/(м²·с) линии расчетной толщины пенного слоя имеют линейный характер изменения, что свидетельствует о возможности применения полученной эмпирической зависимости для прогнозирования требуемой толщины пенного слоя на этом участке.

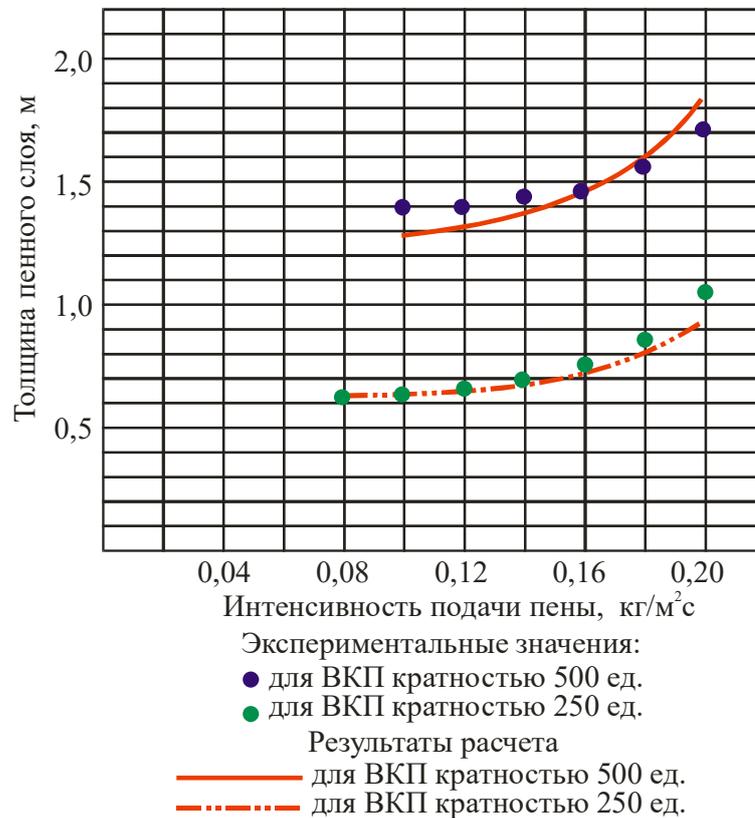


Рисунок 3.5 – Зависимости толщины пенного слоя от кратности ВКП

Для обоснования предложенной эмпирической зависимости 3.12 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 количества 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 3.13:

$$H^{\text{опт}} = \frac{(J_{\text{опт}} - J_{\text{кр}}) \cdot \tau_{\text{туш}} \cdot K_{\text{п}}}{\rho}, \quad (3.13)$$

где $H^{\text{опт}}$ – толщина пенного слоя при оптимальной интенсивности, м;

$J_{\text{опт}}$ – оптимальная интенсивность подачи ВКП, кг/(м²·с);

$J_{\text{кр}}$ – критическая интенсивность подачи ВКП, кг/(м²·с);

$\tau_{\text{туш}}$ – время тушения, с.

$K_{\text{п}}$ – кратность пены;

ρ – плотность рабочего раствора пенообразователя, кг/м³;

Преобразуем формулу 3.13, с учетом того, что:

$$\tau_{\text{туш}} = \frac{Q_{\text{уд}}}{J_{\text{опт}}}, \quad (3.14)$$

где $Q_{\text{уд}}$ – минимальный удельный расход кг/м²;

$$H_{\text{опт}} = \frac{(J_{\text{опт}} - J_{\text{кр}}) \cdot Q_{\text{уд}} \cdot K_{\text{п}}}{J_{\text{опт}} \cdot \rho} \quad (3.15)$$

Зависимости, представленные на Рисунках 3.1 и 3.2, 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/(м²·с), оптимальная интенсивность подачи составила 0,14 кг/(м²·с), минимальный удельный расход составляет 5,2 кг/м². Для ВКП кратностью 500 единиц критическая интенсивность подачи составила 0,089 кг/(м²·с), оптимальная интенсивность подачи составила 0,16 кг/(м²·с), минимальный удельный расход составляет 6,5 кг/м². 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 (3.12) 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 (3.12) целесообразно использовать для построения номограммы, позволяющей

прогнозировать результаты применения ВКП различной кратности при локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ.

3.2 Рекомендации по применению высокократной пены для локализации и ликвидации пламенного горения пролива сжиженного природного газа

Настоящие рекомендации подготовлены на основании результатов научно-исследовательских работ, выполненных в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, анализа данных о современном состоянии проблемы пенного пожаротушения проливов СПГ, а также анализа нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности на производственных объектах с обращением СПГ, как в России, так и за рубежом.

Рекомендации предназначены для использования в практической работе подразделениями, уполномоченными на решение задач в области пожарной безопасности.

Изложенные в рекомендациях результаты исследований могут являться основой для разработки нормативных документов (дополнения к существующим) в области обеспечения пожарной безопасности объектов защиты с обращением СПГ.

Специфика обеспечения пожарной безопасности производственных объектов с обращением СПГ обуславливается решением задач, направленных на:

- предотвращение пролива СПГ путем повышения надежности резервуаров и технологического оборудования;
- предотвращение растекания СПГ за счет сооружения отбортовки по периметру мест вероятного пролива;
- предотвращение воспламенения путем исключения возможных источников зажигания и мониторинга концентрации паров СПГ в воздухе на территории объекта защиты и за его пределами;

– принятие решения о необходимости тушения пролива СПГ на основе анализа данных о его составе, возможности загазованности территории и принятии соответствующих мер после тушения, присутствия на объекте хранящихся нефтепродуктов, условиях окружающей среды и имеющихся огнетушащих веществах;

– предотвращение попадания воды от водяных стволов, водопеночных экранов, систем орошения и охлаждения в горящий пролив СПГ;

– предотвращение каскадного развития аварии в результате разрушения технологического оборудования от непосредственного воздействия пламени и/или теплового потока горящего пролива СПГ.

Пролив СПГ, как правило, образуется в результате возникновения негерметичности технологического оборудования, обрывов трубопроводов слива-налива, разрушения изотермических емкостей.

При загорании пролива СПГ рекомендуется дать возможность ему гореть под контролем, принимая меры к перекрытию доступа СПГ к очагу пожара. Тушение горящего пролива СПГ следует проводить только тогда, когда горение может привести к каскадному развитию аварии, при этом должны быть приняты меры по контролю и борьбе с загазованностью [107].

Для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ допускается применять ВКП. Целесообразность применения ВКП обуславливается малой площадью пятна контакта пены с поверхностью криогенной жидкости и возможностью создания требуемой толщины пенного слоя. Толщина пенного слоя возрастает с увеличением кратности и интенсивности подачи ВКП. Малая площадь пятна контакта предотвращает интенсификацию испарения, а возможность создания требуемой толщины пенного слоя позволяет сформировать условия, при которых существенно снижается тепловой поток и высота пламени. От контакта ВКП с СПГ происходит кратковременное усиление испарения, сопровождающееся по времени с кристаллизацией нижних слоев пены с сохранением ее структуры. Однако образовавшегося слоя твердой пены недостаточно, чтобы остановить

испарение. Над слоем застывшей пены находится слой пены, содержащей жидкую фазу. Подъем холодного газообразного метана сквозь толщину не застывшего слоя приводит к образованию внутри его полых конусообразных ледяных фигур, у вершин которых продолжается пламенное горение. При достижении толщины пенного слоя более 0,5 м, снижается высота пламени, а зона горения фрагментируется на несколько участков. Дальнейший рост толщины пенного слоя приводит к постепенному сужению вершин полых ледяных фигур. Это сопровождается усилением разбавления зоны горения холодным метаном и снижением температуры пламени. На определенном этапе подачи ВКП могут сложиться условия, приводящие к снижению температуры пламени до температуры потухания. После прекращения пламенного горения из вершин полых ледяных фигур продолжается беспрепятственный выход газообразного метана в окружающую среду.

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.

Используемый пенообразователь должен обеспечивать устойчивость ВКП не менее 200 с по [145]. Применение пенообразователей с низкой устойчивостью ВКП приводит к интенсификации испарения СПГ, что затрудняет локализацию и ликвидацию пламенного горения пролива.

Применение ВКП для локализации пламенного горения и контролируемого выгорания допускается для всех марок СПГ. Не допускается применение ВКП для ликвидации пламенного горения пролива СПГ марок Б и В по [81]. Ликвидация

пламенного горения пролива СПГ марок Б и В может привести к возникновению дополнительной загазованности территории предприятия горючими парами тяжелее воздуха и высокой вероятности взрыва.

Для локализации пламенного горения пролива СПГ при помощи ВКП требуется создание пенного слоя, позволяющего снизить высоту пламени и интенсивность теплового потока без ликвидации пламенного горения. Таким образом, реализуется технология контролируемого выгорания пролива СПГ. Для этого рекомендуется подача ВКП кратностью 550 ед. и более с интенсивностью от 0,06 до 0,16 кг/(м²·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 3.6.

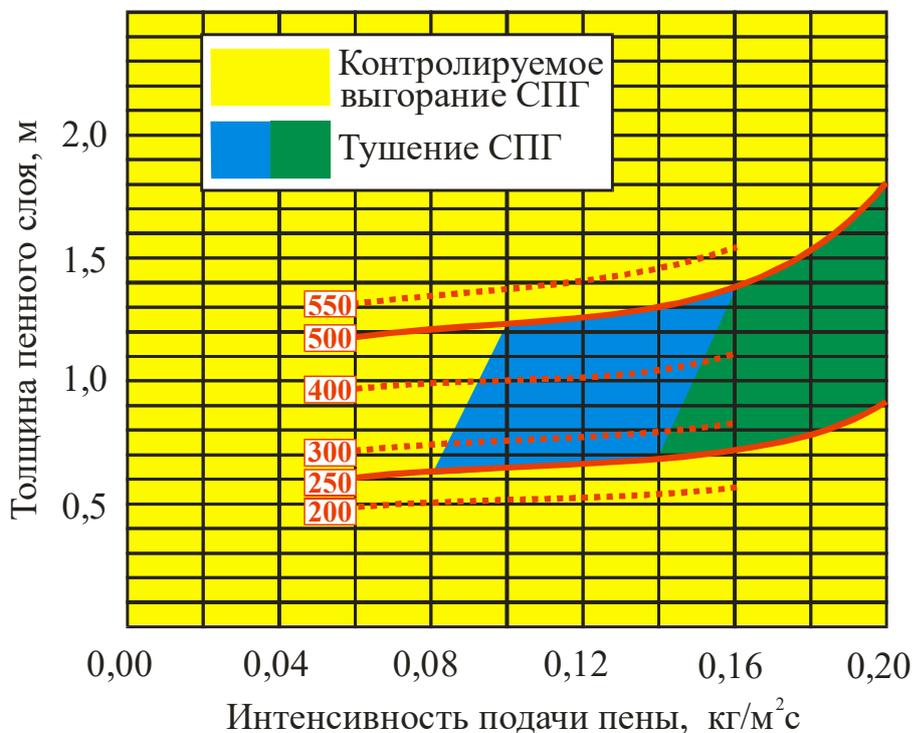


Рисунок 3.6 – Номограмма для определения толщины слоя пены различной кратности от интенсивности подачи ВКП

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.

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 3.6). 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 мин. 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/м².

При скорости ветра более 3,5 м/с и наличии осадков ликвидации пламенного горения пролива СПГ при помощи ВКП существенно затруднена.

Выводы по третьей главе

1. Зависимости времени тушения СПГ и удельного расхода от интенсивности подачи ВКП имеют традиционный вид кривых с вертикальной асимптотой, соответствующей критической интенсивности подачи пены. Кривые удельного

расхода от интенсивности подачи ВКП имеют экстремум, соответствующий оптимальной интенсивности подачи пены. В точке экстремума определен минимальный удельный расход рабочего раствора пенообразователя. По результатам анализа полученных зависимостей установлена взаимосвязь между основными параметрами тушения.

2. Предложен механизм тушения СПГ с использованием ВКП. В основе механизма лежит принцип прекращения горения от снижения температуры пламени до температуры потухания. Обоснование предложенного механизма строится на сравнении температуры над поверхностью горящего СПГ, покрытой слоем ВКП с температурой потухания, рассчитанной по методике Я.Б. Зельдовича.

3. По результатам анализа экспериментальных данных установлено, что для ВКП кратностью 250 единиц критическая интенсивность подачи составляет $0,073 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, оптимальная интенсивность подачи $0,14 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, минимальный удельный расход $5,2 \text{ кг}/\text{м}^2$. Для ВКП кратностью 500 единиц критическая интенсивность подачи составляет $0,089 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, оптимальная интенсивность подачи $0,16 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, минимальный удельный расход $6,5 \text{ кг}/\text{м}^2$. Получена эмпирическая зависимость для определения толщины пенного слоя, требуемого для ликвидации пламенного горения, от кратности и интенсивности подачи ВКП. Расчет требуемой толщины пенного слоя удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента.

4. Разработаны рекомендации по применению ВКП для локализации и ликвидации пламенного горения пролива СПГ. В разработанных рекомендациях рассмотрены два варианта применения ВКП. В первом варианте – для локализации пламенного горения пролива СПГ. Во втором варианте – для ликвидации пламенного горения пролива СПГ. Наиболее рациональным и безопасным является вариант с подачей ВКП для локализации пламенного горения и контролируемого выгорания пролива. Рекомендации позволяют сделать выбор требуемой кратности и интенсивности подачи ВКП в зависимости от сценария ликвидации аварийной ситуации.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по развитию рынка малотоннажного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2025 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 13.02.2021 № 350-р / КонсультантПлюс: информационно-правовой портал – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377286/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/ (дата обращения 01.08.2024 г.).
2. Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р / КонсультантПлюс: информационно-правовой портал – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения 01.08.2024 г.).
3. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 30 марта 2021 г. № 484 / КонсультантПлюс: информационно-правовой портал – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_381261/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b/ (дата обращения 01.08.2024 г.).
4. Остапкович, Г.В. Деловая активность российской промышленности в декабре 2022 года. Проблемы отрасли (по результатам конъюнктурных опросов) [Текст] / Остапкович Г.В., Липкинд Т.М., Лола И.С. – М.: НИУ ВШЭ, 2023. –11 с.
5. 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 BBZWAК.
6. Государственный ежегодный отчет публичного акционерного

общества «НОВАТЭК» за 2023 год [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.novatek.ru/common/upload/doc/04_Godovoy_otchet_2023_RUS.pdf (дата обращения 02.02.2024 г.).

7. Об утверждении долгосрочной программы развития производства сжиженного природного газа в РФ» [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 16 марта 2021 г. № 640-р / КонсультантПлюс: информационно-правовой портал – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_380139/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/ (дата обращения 01.08.2024).

8. CTIF World Fire Statistic 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ctif.org/world-fire-statistics> (дата обращения 03.04.2024 г.).

9. World LNG Outlook 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.shell.com/what-we-do/oil-and-natural-gas/liquefied-natural-gas-lng.html> (дата обращения 03.04.2024 г.).

10. Якубов, И.Х. Подрыв газопроводов «Северный поток» и «Северный поток-2» как угроза энергетической безопасности на постсоветском пространстве [Текст] / Якубов И.Х. // Постсоветские исследования – 2023. – №1(6). – С. 20-29.

11. Самигуллин, Г.Х. Обзор крупных аварий на объектах получения и применения сжиженного природного газа [Текст] / Г.Х. Самигуллин, Е.Н. Кадочникова, М.А. Симонова // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы формирование культуры безопасности жизнедеятельности: приоритеты, проблемы, решения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26 сентября 2018 г. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2018. – С. 82-87.

12. Aronson, D.J. US public and private regulation of LNG transport / D.J.

Arnston, W. Westermeyer // MARINE POLICY. – January. – 1982. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://sci-hub.ru/10.1016/0308-597x\(82\)90039-2](https://sci-hub.ru/10.1016/0308-597x(82)90039-2) (дата обращения: 20.05.2022 г.).

13. Болодьян, И.А. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Анализ состояния проблемы [Текст] / И.А. Болодьян, В.П. Молчанов, Ю.И. Дешевых, Ю.Н. Шебеко, В.П. Некрасов, В.И. Макеев, И.М. Смолин, А.А. Пономарев, В.Л. Карпов, Д.М. Гордиенко // Пожарная безопасность. – 2000. – №2. – С. 86-96.

14. Колылов, Н.П. Физико-химический механизм реакций, протекающих с экстремально большими скоростями в распространяющемся пламени и в детонации газов [Текст] / Н. П. Копылов, С.Н. Копылов, И. А. Болодьян, В. В. Азатян, В. М. Прокопенко, Г.М. Гордиенко // Журнал физической химии. – 2022. – Т. 96. – № 3. – С. 357-364. – DOI 10.31857/S0044453722030062. – EDN RQGHDO.

15. Kuuskraa, V. / Unconventional Natural Gas / Kuuskra V. // Advances in energy systems and technology. – Vol. 3. – 1982. – P.257-272.

16. Алешков, М.В. Перспективы научных исследований свойств воздушно-механической пены для локализации и ликвидации горения разливов сжиженного природного газа [Текст] / М. В. Алешков, В. П. Молчанов, Д. Л. Бастриков, С.А. Макаров, А.В. Третьяков, Д.А. Иощенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 1. – С. 12-20. – DOI 10.25257/FE.2022.1.12-20. – EDN QTGABM.

17. NFPA 59A: Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-59a-standard-development/59a> (дата обращения: 20.05.2022 г.).

18. Чугуев, А.П. Средства предотвращения и ликвидации аварийных ситуаций с пожарами на объектах с обращением сжиженных газов [Текст] / Чугуев А.П., Лагозин А.Ю., Мордвинова А.В., Сычев А.Н. // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 8. – С. 74–78.

19. Raj, P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard

prediction challenges / P.K. Raj // Journal of Hazardous Materials – (2007) – Vol. 3 – P.444-464.

20. Persson, B. FoamspeX Large scale foam application – modeling of foam spread and extinguishment / B. Persson, H. Person, D // Fire Technology. – 2003. – №39. – P.347-362.

21. Qiao, Y. Assessment of the effects of release variables on the consequences of LNG spillage onto water using FERC models / Y. Qiao H.H. West, M.S. Mannan, D.W. Johnson, J.B. Cornwell // Journal of Hazardous Materials. – 2006. – №1-3. – P.155-162.

22. Koopman, R. P. Lessons learned from LNG safety research. / R.P. Koopman, D.L. Ermak // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – №140 (3). – P.412-428.

23. Newwell, G. LNG fire control, fire extinguishment and vapor dispersion tests / G. Newwell // University Engineers Inc. – 1972. – P.99.

24. Lenoir, J.R. Radiative transfer through a cloud of absorbing scattering particles / J.R. Lenoir, C. F. Sanders // AIChE Journal. – №18(1). – 1972.

25. Briscoe, F. Spread and evaporation of liquid / F. Briscoe, P. Shaw // Progress in Energy and Combustion Science. – 1980. – №1. – P.127-140.

26. Liquefied Flammable Gases Storage and Handling. Engineering Codes and Regulations // Imperial Chemical Industries. – 1970. – Vol. 1. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sci-hub.ru/10.1017/S0022050700067504> (дата обращения: 20.05.2022 г.).

27. Drost, B. Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks / B. Drost, W. Schoen // Journal of Hazardous Materials. – 1988. – Vol. 20. P.41–53.

28. Lev, Y. Novel method for controlling LNG pool fires / Y. Lev // Fire Technology. – 1981. – №4. – P.275-284.

29. Zuber, K. LNG facilities. Engineered fire protection systems / K. Zuber // Fire Technology. – 1976. – P.41-48.

30. Buchlin, J-M. Thermohydraulic modelling of liquid sprays. Edited in Two-phase flow with phase transition / J-M. Buchlin // VKI-LS. – 1995. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sci-hub.ru/10.1007/978-94-011-2632-8> (дата

обращения: 20.05.2022 г.).

31. Barron, R. Cryogenic heat transfer / R. Barron // Taylor&Francis. – 1999. – P.369.
32. Zhanga, Q. Experimental study of flashing LNG jet fires following horizontal releases / Q. Zhanga, D. Liang, J. We // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – January 2019. – Vol. 57. – P. 245-253.
33. Zhang, B. Experimental Study of LNG Pool Fire on Land in the Field / B. Zhang, D. Laboureur, Y. Liu // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2018. – 57(42). – P. 14297-14306.
34. Guo, X. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG / X. Guo, C. Ye, X. Liang, X. Pan, M. Hua // Safety Science. – May 2021. – Vol. 137. – P. 150-157.
35. Zhang, B. Blanketing effect of expansion foam on liquefied natural gas (LNG) spillage pool / B. Zhang, Y. Liu, T. Olewski // Journal of Hazardous Materials. – 15 September 2014. – Vol. 280. – P. 380-388.
36. Wang, Y. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire / Y. Wang // Journal of Hazardous Materials. – November. 2008. – №165. – P. 612-622.
37. Zhang, B. Liquefied Natural Gas Vapor Hazard Mitigation with Expansion Foam Using a Research – Scale Foam Generator / B. Zhang, B. Harding, Y. Liu, M. S. Mannan // Industrial & Engineering Chemistry Research 2016– 55 – P. 6018-6024.
38. Zheng, W. Fire-Fighting Design of Gasification Station for Liquefied Natural Gas / W. Zheng // Advanced Materials Research. – May 2012. – Vol. 512. – P. 2505-2508.
39. Куприн, Г. Н. Нерешенные проблемы пожаровзрывобезопасности энергоресурсов (СУГ и СПГ) как обратная сторона успехов энергетической стратегии Российской Федерации [Текст] / Г. Н. Куприн, И. М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 4. – С. 42-50.
40. Абдурагимов, И. М. Методы, средства и технологии взрывопожаропредотвращения на объектах производства и транспортировки горючих криогенных жидкостей [Текст] / И. М. Абдурагимов, Г. Н. Куприн //

Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 3. – С. 14-25. – EDN TVGVQJ.

41. Абдурагимов, И. М. Проблемы пожаровзрывобезопасности российских СУГ и СПГ: тушить нельзя купировать! [Текст] / И.М. Абдурагимов, Г.Н. Куприн // Каталог «Пожарная безопасность». – М.: Изд-во «Гротек», 2013. – С. 46-50.

42. Майорец, М. Сжиженный газ – будущее мировой энергетики: Майорец, Симонов/ М. Майорец, С.К. Симонов. – Москва: Альпина Паблишер, 2019. – 360 с. – ISBN 978-5-9614-4403-2.

43. IEA World Energy Outlook 2000 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2000> (дата обращения 01.08.2024 г.).

44. IEA World Energy Outlook 2015 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2015> (дата обращения 01.08.2024 г.).

45. IEA Renewables 2020 Report – March 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020> (дата обращения 01.08.2024 г.).

46. IEA World Energy Outlook 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (дата обращения 01.08.2024 г.).

47. BP Statistical Review of World Energy 2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022.pdf> (дата обращения 01.08.2024 г.).

48. Green biofuels: A proven fuel for gas turbines // DIESEL & GAS TURBINE WORLDWIDE. – April, 2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://magazinelib.com/all/diesel-gas-turbine-worldwide-april-june-2022/> (дата обращения 01.08.2024 г.).

49. Lee, H. Dawning of a New Era: The LNG Story / H. Lee, John F. Kennedy School of Government, Harvard University – September 2005. – P. 98-112.

50. Omar, M.N. Thermodynamic and economic evaluation of existing and prospective processes for liquefaction of natural gas in Malaysia / Mohd Nazri bin Omar // University of Malaysia, Perlis – January 2016 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/309920941_Thermodynamic_and_economic_evaluation_of_existing_and_prospective_processes_for_liquefaction_of_natural_gas_in_Malaysia (дата обращения 05.06.2024 г.).

51. Sonatrach History [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.fundinguniverse.com/company-histories/sonatrach-history>. (дата обращения 01.08.2024 г.).

52. BP Statistical Review of World Energy 2021 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021.pdf> (дата обращения 01.08.2024 г.).

53. «Сахалин-2» Первый в России завод по производству сжиженного природного газа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/projects/sakhalin2/> (дата обращения 05.06.2024 г.).

54. «Криогаз-Высоцк» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.novatek.ru/ru/about/lng-projects/criogas/> (дата обращения 05.06.2024 г.).

55. Уразгалиев, В.Ш. Газовая составляющая энергетической безопасности России [Текст] / Уразгалиев В.Ш., Титков М.В. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2018. – Т. 34. – № 2. – С. 176-216.

56. СПГ карта экономической лаборатории Александра Климентьева [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ак-лаб.рф/lngmap> (дата обращения 05.06.2024 г.).

57. Outlook for Energy: A View to 2040 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.pro-gas.ru/images/data/gallery/0_28_EM_2040.pdf (дата обращения 05.06.2024 г.).

58. Даценко, Е.Н. Стратегические направления развития предприятий нефтегазовой отрасли [Текст] / Даценко Е.Н., Орлова И.О., Косюк П.В., Мусаева А.С., Чермит Т.А., Авакимян Н.Н. // 526 Научное обозрение: теория и практика. –

2023. – Т. 13. – № 5 (99). – С. 674-683.

59. «Как Америка взорвала "Северный поток". Перевод статьи журналиста Сеймура Херша» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rg.ru/2023/02/12/3498781> (дата обращения: 12.02.2023).

60. Аникин, В. И. Энергетическая политика ЕС до диверсии на газопроводах «Северный поток» и «Северный поток - 2» [Текст] / В. И. Аникин // Вестник Дипломатической академии МИД России. – 2023. – № 1(20). – С. 95-111.

61. Козин, В. В. Развитие технологий производства, хранения, транспортировки и использования СПГ [Текст] / В. В. Козин // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 08–09 ноября 2022 года /: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. – 2023. – С. 49-50. – EDN HWHZHK.

62. Калашников, П. К. Аудит энергоэффективности технологического процесса сжижения природного газа с применением имитационного моделирования [Текст] / П. К. Калашников, Р. Л. Барашкин, Д. Н. Жедяевский // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 08–09 ноября 2022 года /: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. – 2023. – С. 41-46. – EDN HWLEJJ.

63. Титков И.А. Цифровой разрыв в сфере технологий добычи и производства сжиженного природного газа: стратегический фактор ослабления экономической безопасности страны // Экономика и социум: современные модели развития. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 309-329.

64. Сергеева З.В. Четвертый энергетический переход и европейский энергетический кризис: уроки для ЕАЭС // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. – 2023. – Т. 17. – № 2 (44). – С. 153-168.

65. Ши, Ц. Анализ перспектив импорта сжиженного природного газа в КНР в условиях устойчивого развития китайской индустрии природного газа

[Текст] / Ц. Ши, М. В. Афанасьев // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : Сборник трудов всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции, Санкт-Петербург, 30 мая 2022 года. Ч. 2. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. – 2022. – С. 231-236.

66. Телегина Е.А., Федорова В.А. Сжиженный природный газ в азиатско-тихоокеанском регионе: обеспечение энергетической безопасности и возможности экспорта для России // Нефть, газ и бизнес. – 2017. – № 7. – С. 41-50.

67. Зенкина Е.В., Ивина Н.В. Международное сотрудничество в энергетике как основа укрепления геополитических интересов России и ее устойчивого экономического роста // Международный научный журнал. – 2019. – № 2. – С. 78-84.

68. Проскурова, Н. Э. Нефтегазовый комплекс России и страны БРИКС [Текст] / Н. Э. Проскурова // Вопросы экономики и управления нефтегазовым комплексом: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов нефтегазового комплекса, Москва, 07 июня 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2023. – С. 29-31. – EDN IIWOFK.

69. Российский газ «сжижился» с реальностью // онлайн-газета «Коммерсантъ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/6443078> (дата обращения: 05.06.2023 г.).

70. Производственные мощности проекта «Ямал СПГ» // официальный сайт ПАО «НОВАТЕК» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.novatek.ru/ru/about/lng-projects/yamal-lng/> (дата обращения: 05.06.2023).

71. Новость о запуске завода СПГ «Портовая» в Ленинградской области // онлайн-журнал «Нефтегаз» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/spg-szhizhenyuy-prirodnyy-gaz/753575-teper-ofitsialno-zapustili-kspg-portovaya/> (дата обращения: 07.10.2022 г.).

72. Кондратов, Д. Будущее мирового рынка природного газа / Д. Кондратов //

Общество и экономика. – 2023. – № 4. – С. 64-85. – DOI 10.31857/S020736760025155-9. – EDN JIRGVQ.

73. Бармин, И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра [Текст] / И.В. Бармин, И.Д. Кунис // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.

74. Нуруллин, А. Х. Природный газ вместо жидких видов топлива / А. Х. Нуруллин // NovaUm.Ru. – 2020. – № 28. – С. 4-7. – EDN VMMEBU.

75. Witlox, H. Sub-cooled and flashing liquid jets and droplet dispersion I. Overview and model implementation/validation/ W. Henk, M. Harper, A. Oke, P. Bowen, P. Kay// Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2010. – № 23. – p. 831-842.

76. Горбачев, С.П. Испытания макета двухбололочечного резервуара для хранения и транспортирования сжиженного природного газа / С. П. Горбачев, В. Л. Карпов, Т. И. Клеблеев, С.В. Люгай, В.Ю. Семенов // Газовая промышленность. – 2022. – № 2(828). – С. 88-93. – EDN MAEBZL.

77. European Maritime Safety Agency (EMSA) Guidance on LNG Bunkering 2018 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://awpmarine.com/News/Latest-News/emsa-guidance-on-lng-bunkering> (дата обращения 03.06.2023 г.).

78. ГОСТ Р 57431-2017 Газ природный сжиженный. Общие характеристики – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.

79. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте [Текст] / Ф. Г. Гайнуллин – М.: Недра, 1986. - 254 с.

80. Кириллов, Н. Г. Расчет поражающих факторов при авариях на подземных хранилищах СПГ [Текст] / Н. Г. Кириллов, А. Н. Лазарев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 3(27). – С. 33-37. – EDN OXXGDP.

81. ГОСТ 34894-2022 Газ природный сжиженный. Технические условия [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт ПРИНЯТ на Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 сентября 2022 г. № 154-П) // КонсультантПлюс: информационно-правовой портал [сайт] Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=OTN&n=34279#KuDDm4VyrTJGE7G61> (дата обращения 01.03.2023 г.).

82. Алешков, М.В. 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.

83. Болодьян, И. А. Экспериментальные исследования проливов криогенных жидкостей (топлив) / И. А. Болодьян, Л. П. Вогман // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 8. – С. 13-18. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-8-13-18. – EDN LVLGJY.

84. Середенко, Е. С. Математическая модель испарения сжиженного природного газа и анализ влияния исходного состава на скорость испарения / Е. С. Середенко, О. В. Пахомов, А. Ю. Баранов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 603-610. – DOI 10.17586/2226-1494-2020-20-4-603-610. – EDN XQSSZQ.

85. Chan, S.T. Numerical simulations of LNG vapor dispersion from a fenced storage area / S.T. Chan // Journal of Hazardous Materials. – 1992. – № 30. – P. 195-224.

86. Николенко, Т. М. Влияние площади обвалования на процесс формирования и распространения опасных облаков при проливах сжиженного природного газа / Т. М. Николенко, С. В. Ефремов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – № 2(54). – С. 198-202. – DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0039. – EDN RZCBCA.

87. Шестакова, А.А. Моделирование рассеивания паровоздушного облака при истечении сжиженного природного газа (СПГ) в атмосферу [Текст] / А.А. Шестакова, А.Д. Галеев, Е.В. Старовойтова, С.И. Поникаров, Л.Н. Мухамадиева // Научные труды КубГТУ. – № 3. – 2019. – С. 723-733.

88. Brown, T.C. Falcon Series Data Report. 1987 LNG Vapor Barrier Verification Field / T.C. Brown, R.T. Cederwall, S.T. Chan - Lawrence Livermore National Laboratory. – 1990. – P. 665.

89. Старовойтова, Е. В. Основы прогнозирования последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов: монография / Е. В. Старовойтова, А. Д.

Галеев, С. И. Поникаров.; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 156 с.

90. ISO 6578:2017(E) Refrigerated hydrocarbon liquids – Static measurement – Calculation procedure Edition 2. – 2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/69289.html> (Дата обращения: 10.02.2023 г.).

91. Luketa, A. The phoenix series large-scale methane gas burner experiments and liquid methane pool fires experiments on water / A. Luketa, T. Blanchat // *Combustion and Flame*. – October 2015. – №162(12). – P. 4497-4513.

92. Зельдович Я. Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика / Я.Б. Зельдович – М.: Наука, 1984.—374 с.

93. Абдурагимов, И. М. Предельные явления в горении как научно-теоретическая основа пожаровзрывобезопасности / И. М. Абдурагимов // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2012. – Т. 21. – № 11. – С. 18-26. – EDN PRYSHX.

94. Абдурагимов, И. М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения / И. М. Абдурагимов // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2012. – Т. 21. – № 4. – С. 60-82. – EDN OZZUSH.

95. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе – М.: ГИЛЛ, 1948. — 448 с. Перевод с английского В. В. Воеводского под редакцией и с дополнениями Д.А. Франк-Каменецкого.

96. Tessé, L. Monte Carlo Modeling of Radiative Transfer in a Turbulent Sooty Flame / L. Tessé, F. Dupoirieux, J. Taine // *International Journal of Heat Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47. – P. 555-572.

97. Mazumder, S. A PDF Approach to Modeling Turbulence-Radiation Interactions in Nonluminous Flames / S. Mazumder, M. F. Modest // *International Journal of Heat Mass Transfer*. – 1999. – Vol. 42. – P. 971-991.

98. Li, G. Application of Composition PDF Methods in the Investigation of Turbulence-Radiation Interactions / G. Li, M.F. Modest // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2002. – Vol. 73. – P. 461-472.

99. Handbook of LNG [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.google.ru/books/edition/_/EvMRDAEACAAJ?hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwj

Er-a8hcWRAXXIKBAIHfzbIM0Q7_IDegQIDRAE (дата обращения 01.08.2024 г.).

100. Гордиенко, Д. М. Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазодобычи в Арктическом бассейне / Д. М. Гордиенко // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 1(71). – С. 53-61. – EDN ZDRJVT.

101. Fire causes shutdown of Freeport LNG export terminal [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=52859> (дата обращения 23.07.2023 г.).

102. Shell suspends production at Prelude FLNG after fire breaks out [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.offshore-energy.biz/shell-suspends-production-at-prelude-flng-after-fire-breaks-out/> (дата обращения 23.07.2023 г.).

103. Смирнова, В.В. Анализ риска аварий типового комплекса сжиженного природного газа [Электронный ресурс] / В.В. Смирнова // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции. – М.: РГУ нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. – 2023. – С. 69-74. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=kqjabz> (дата обращения 06.06.2024 г.).

104. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РОСТЕХНАДЗОР «Уроки, извлеченные из аварий» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения 06.06.2024 г.).

105. Сафонов, В. С. Проблемы обеспечения безопасности объектов сжиженного природного газа / В. С. Сафонов. Том Часть I. – Москва: ЗАО "Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности", 2020. – 320 с. – ISBN 978-5-9687-0947-9. – EDN FHJQVO.

106. Гордиенко, Д. М. Оценка пожарного риска для крупномасштабного хранилища сжиженного природного газа [Текст] / Д. М. Гордиенко, А. Ю. Шебеко, А. В. Зубань // Пожарная безопасность. – 2017. – № 3. – С. 26-31. – EDN ZGUUOT:

107. СП 326.1311500.2017 ОБЪЕКТЫ МАЛОТОНАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ СЖИЖЕННОГО

ПРИРОДНОГО ГАЗА Требования пожарной безопасности \ \ Москва
Стандартинформ – 2018.

108. Сравнительный анализ российских и международных нормативных документов по пожарной безопасности береговых объектов по производству и хранению сжиженного природного газа / Ю. Н. Шебеко, Д. М. Гордиенко, А. Ю. Лагозин, С. С. Воевода // Пожарная безопасность. – 2016. – № 4. – С. 145-158. – EDN XEHOYD.

109. Wighus, R. Fires on offshore process installations / R. Wighus // Journal of Loss Prevention in the Process Industries – 1994 – Vol. 7 (4).

110. Гордиенко, Д. М. Обеспечение пожарной безопасности морских стационарных нефтегазодобывающих платформ / Д. М. Гордиенко, А. Ю. Лагозин, А. В. Мордвинова О.Н. Шебеко, В.П. Некрасов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки» – 2019. – № 2(39). – С. 136-142. – EDN DBHLTV.

111. Rana, M.A. Forced dispersion of LNG vapor with water curtain / M.A. Rana, M.S. Mannan // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2010. – Vol. 23. – P. 768-772.

112. Воевода, С.С. Зарубежный опыт тушения оборудования с горючими газами системами порошкового пожаротушения [Текст] / С.С. Воевода, Д.М. Гордиенко, Ю.Н. Шебеко и др.// Пожарная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 130-142.

113. DIN EN 615:2009-08 Fire protection – Fire extinguishing media – Specifications for powders (other than class D powders). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mystandards.biz/standard/dinen-615-1.8.2009.html> (дата обращения 01.08.2024 г.).

114. Chen, C-C. Nitrogen dilution effect on the flammability limits for hydrocarbons / C-C. Chen, T-C. Wang, H-J. Liaw, H.C. Chen // Journal of Hazardous Materials. – Vol. 166. – 30 July 2009. – P. 880-890.

115. Бегиншев, И. Р. Горение и флегматизация воздушных смесей дихлорметана / И. Р. Бегиншев, А. К. Беликов, А. С. Андросов, П. В. Комраков // Пожарная безопасность. – 2006. – № 1. – С. 42-45. – EDN KVOGLH.

116. Чугуев, А.П. Научное обеспечение пожарной безопасности

производственных объектов с обращением сжиженных горючих газов / А.П. Чугуев. – Балашиха: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – 174 с. – EDN MLNRJI.

117. Чугуев, А.П. Газообразные и сжиженные инертные газы – эффективные и экологически безопасные средства пожаротушения [Текст] / А.П. Чугуев, А.Ю. Лагозин, И.А. Болодьян, А.Н. Сычев // Пожарная безопасность. – 2017. – №3. – С.70-75.

118. Чугуев, А. П. Аналитический обзор средств обеспечения пожарной безопасности при работах со сжиженными горючими газами / А. П. Чугуев, А. В. Мордвинова, А. Н. Сычев, М. В. Федоринов // Актуальные вопросы пожарной безопасности. – 2020. – № 3(5). – С. 25-29. – DOI 10.37657/vniipo.avpb.2020.93.56.003. – EDN IMTPIU.

119. Henry Eduardo Sánchez Rincón RISK BASED FIRE PROTECTION STRATEGIES FOR LNG/LPG JETTIES [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://static1.squarespace.com/static/5cdbcb5a7a1fbd56ceb62430/t/5e675b4f95aba23ba928b3cd/1583831896353/Henry+Eduardo+sanchez+rincon_thesis.pdf (дата обращения: 10.05.2023 г.).

120. DIN EN 1473 Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://standards.globalspec.com/std/10052049/din-en-1473> (дата обращения: 14.06.2023 г.).

121. DIN EN 12065 Installations and equipment for liquefied natural gas - Testing of foam concentrates designed for generation of medium and high expansion foam and of extinguishing powders used on liquefied natural gas fires [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.en-standard.eu/din-en-12065-installations-and-equipment-for-liquefied-natural-gas-testing-of-foam-concentrates-designed-for-generation-of-medium-and-high-expansion-foam-and-of-extinguishing-powders-used-on-liquefied-natural-gas-fires/> (дата обращения: 14.06.2023 г.).

122. Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: СП 240.1311500.2015 // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/597857362/> (дата обращения 03.06.2023 г.).

123. Болодьян, И.А. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Процессы испарения и формирования пожаровзрывоопасных облаков при проливе жидкого метана. Методики оценки параметров [Текст] / И.А. Болодьян, В.П. Молчанов, Ю.И. Дешевых, Ю.Н. Шебеко, В.П. Некрасов, В.И. Макеев, И.М. Смолин, А.А. Пономарев, В.Л. Карпов, Д.М. Гордиенко // Пожарная безопасность. – 2000. – №4. – С.108-121.

124. Болодьян, И.А. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Расчет поражающих факторов при авариях на изотермическом резервуаре [Текст] / И.А. Болодьян, В.П. Молчанов, Ю.И. Дешевых, Ю.Н. Шебеко, В.П. Некрасов, В.И. Макеев, И.М. Смолин, А.А. Пономарев, В.Л. Карпов, Д.М. Гордиенко // Пожарная безопасность. – 2001. – №1. – С.31-52.

125. Шебеко, Ю.Н. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами [Текст] / Ю.Н. Шебеко, В.Н. Филиппов, В.Ю. Навценя, А.К. Костюхин, П.М. Токарев, Э.Д. Замышевский // Пожаровзрывобезопасность. – 1999. – Т.8. – №4. – С.33-42.

126. Тагиев, Р.М. Первые в мировой практике широкомасштабные испытания по проливу сжиженного природного газа и последующего его горения в рамках научно-технического сотрудничества ООО «Газпром газобезопасность» и «GDF Suez S.A.» [Текст] / Р.М.Тагиев // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2013. – №2. – С.58-61.

127. Kamperveen, J.P. Heat load resistance of cryogenic storage tanks – Results of LNG Safety Program / J.P. Kamperveen, M.P.N. Spruijt, J.E.A.Reinders // TNO. – 2016. – P. 70.

128. Qian-xi, Z. Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball / Z. Qian-xi, L. Dong. // Procedia Engineering. – 2013. – V.52. – P.602-606.

129. Методическое пособие по выбору средств и способов локализации и ликвидации пожаров с участием горящего сжиженного природного газа. –М.: ВНИИПО, 2023.

130. D. Burgess, M.G. Zabetakis, Fire and Explosion Hazards of LNG, US Bureau of Mines Investigation Report # 6099, 1962. [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.google.ru/books/edition/Fire_and_Explosion_Hazards_Associated_wi/0eay5iU69T0C?hl=ru&gbpv=0/ (дата обращения 05.11.2023 г.).

131. Analyses of Natural Gases of the United States, by US Bureau of Mines.1962. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://openlibrary.org/works/OL1506940W/Analyses_of_Natural_Gases_of_the_United_States_1962?edition=key%3A/books/OL21736162M/ (дата обращения 05.11.2023 г.).

132. Ishimasa, Y. Worldwide cryogenics – Japan: The Tokyo Gas Company / Y. Ishimasa // Cryogenics. – February 1979. – Vol. 19, Issue 2 – P. 67-72.

133. American Gas Association (AGA). 1974. LNG Safety Program, Interim Report on Phase II Work, IS-3-1. American Gas Association, Arlington. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1184954/m2/1/high_res_d/6875794.pdf. (дата обращения 05.11.2023 г.).

134. Sanchez-Cruzat, J.M.B., Experimental study on the mitigation of flammable vapor dispersion and fire hazards immediately following LNG spills on land. American Gas Association Arlington – 1974. – Vol. 22 (3) – P. 615–660.

135. Betteridge, S. Consequence modelling of large LNG pool fires on water / J.R. Hoyes, S. Gant, M. Ivings // Journal of Loss Prevention in the Process Industries – 2014 – 56(159).

136. Пожнефтехим сделал доклад по контролируемому выгоранию СПГ на круглом столе ВНИИПО в Оренбурге [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.pnx-spb.ru/media_centra/news/pozhneftekhim-sdelal-doklad-po-kontroliruемому-vygoraniyu-spg-na-kruglom-stole-vniipo-v-orenburge/ (дата обращения 05.11.2023 г.).

137. Патент на полезную модель № 214788 U1 Российская Федерация, МПК А62С 5/02. Пеногенератор: № 2022120245: заявл. 22.07.2022: опубл. 14.11.2022 / Е.

Д. Веселов, С. А. Панов, И. Г. Романов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Пожнефтехим". – EDN DIJRGQ.

138. Разработка пенообразователей и смачивателей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://egida-ptv.ru/services/razrabotka-penoobrazovatelej-i-smachivatelej/> (дата обращения 05.11.2023).

139. ANGUS FIRE Fixed TURBEX Foam Systems [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.angusfire.co.uk/products-catalogue/fixed-turbex-and-skids/> (дата обращения 05.11.2023 г.).

140. Ansul High Expansion Systems [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.ansul.com/foam-concentrates-and-equipment/discharge-devices/high_expansion_systems_fsp/high-expansion-systems/ / (дата обращения 05.11.2023 г.).

141. LIQUEFIED NATURAL GAS HAZARDS MITIGATION WITH HIGH EXPANSION FOAM / A Dissertation by BIN ZHANG - Texas A&M University December 2015 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://files.core.ac.uk/download/pdf/79652216.pdf> (дата обращения 21.07.2023 г.).

142. Шароварников, А. Ф. Противопожарные пены. Состав, свойства, применение / А. Ф. Шароварников. – Москва: Издательский дом "Калан", 2000. – 464 с. – EDN UECFFX.

143. Алешков, М.В. 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.

144. Шароварников, А. Ф. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов [Текст]: научное издание / А. Ф. Шароварников // 2-е изд., испр. и доп. – М.: Пожнаука, 2007. – 380 с.

145. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 50588-2012 / КонсультантПлюс: информационно-правовой портал – Режим доступа:

<https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=15938#xbCGP5Vq2Li0mMkW1/> (дата обращения 01.08.2024 г.).

146. ГОСТ Р 50588-1993 «Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3547/>.

147. 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.

148. ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73) АЗОТ ГАЗООБРАЗНЫЙ ЖИДКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ Москва Стандартиформ 2007 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/770/> (дата обращения 01.08.2024).

149. 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>.

150. Баратов, А.Н. Пожаротушение на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности [Текст] / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1971. – 416 с.

151. Ye, C. Development of heat transfer and evaporation model of LNG covered by Hi-Ex foam / C. Ye // Journal of Loss Prevention in the Process Industries – 2016. – Vol. 44 – P. 1-9.

152. Андреев, А.П. 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 LLBZYO.

153. Takeno, K. Effects of high expansion foam dispersed onto leaked LNG on the atmospheric diffusion of vaporized gas / K. Takeno, T. Ichinose, K. Tokuda, R. Ohba // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – March 1996. – Vol. 9. – P.125-133.

154. Котов, А.А. Применение высокократной пены при тушении пожаров [Текст] / А.А. Котов, И.И. Петров, В.Ч. Реутт – М.: Издательство литературы по строительству. – 1972. – 113 с.
155. Suardin, J. A. Control of Vapor Dispersion and Pool Fire of Liquefied Natural Gas (LNG) with Expansion Foam / J. A. Suardin, Y. Wang, M. Wilson, M.S. Mannan // Journal of Hazardous Materials – November 2008. – 165(1-3). – P. 612-622.
156. Тихомиров, В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения [Текст] / В.К. Тихомиров – 2-е изд., перераб. – М.: Химия. – 1983. – 264 с.
157. Coelho, P. J., Detailed Numerical Simulation of Radiative Transfer in a Nonluminous Turbulent Jet Diffusion Flame / P. J. Coelho // Combust. Flame – 2004. – Vol. 136. – P. 481–492.
158. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов: Руководство. – М.: ВНИИПО. – 2002. – 77 с.
159. Дрепер, Н. Дрейпер, Норман. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Н. Дрепер, Г. Смит; пер. с англ. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Финансы и статистика. – 1986. – 365 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

ООО ЭГИДА ПТВ

Россия, 127299, Москва, ул. Клары Цеткин. д. 18Б, к.1, эт.1, пом. VI
 Тел./Факс: +7 (495) 787-42-82/81 e-mail: info@egida-ptv.ru
 ИНН 7743096136, КПП 774301001, ОГРН 1157746316485
 Р/С 40702810838040116107 в ПАО Сбербанк г. Москва,
 БИК 044525225, К/С 30101810400000000225



WWW.EGIDA-PTV.RU

ЭГИДА

исх. № 88 от 15.05 2025 г.
 на № _____ от _____ 2025 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
 ООО «Эгида ПТВ»

_____ А.В. Третьяков

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
 Битуева Рашида Борисовича:
 «Параметры тушения пожара пролива сжиженного природного газа
 высокократной пеной»

Комиссия в составе:

генерального директора ООО «Эгида ПТВ» Третьякова Алексея Владимировича (председателя комиссии);

руководителя испытательной лаборатории ООО «Эгида ПТВ» Гончарова Артема Александровича (члена комиссии)

подтверждает, что результаты диссертационной работы Битуева Р.Б. на тему: «Параметры тушения пожара пролива сжиженного природного газа высокократной пеной» использовались для доработки рецептуры пенообразователя ПО-LGF в части стабилизации и пенообразующей способности рабочего раствора и повышения устойчивости высокократной пены применяемой для ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа.

Комиссия:

Председатель комиссии

А.В. Третьяков

Члены комиссии:

А.А. Гончаров

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель начальника
Академии ГПС МЧС России

по учебной работе

полковник внутренней службы

В.С. Шнышко

2025 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы преподавателя кафедры пожарной безопасности в строительстве (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты) Академии ГПС МЧС России

Битуева Рашида Борисовича
в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: начальника кафедры общей и специальной химии, кандидата технических наук, доцента Саутиева Магомета Ибрагимовича; профессора кафедры общей и специальной химии, кандидата химических наук, доцента Дегтярева Сергея Викторовича; профессора кафедры общей и специальной химии, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника Андреева Александра Петровича подтверждает, что результаты диссертационной работы Битуева Р.Б. «Параметры тушения пожара пролива сжиженного природного газа высокократной пеной» внедрены в учебный процесс кафедры общей и специальной химии для проведения практических и лабораторных занятий по дисциплине «Химия огнетушащих веществ» с обучающимися по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность», профиль «Пожарная безопасность».

Председатель комиссии:
начальник кафедры ОиСХ
кандидат технических наук, доцент

М.И. Саутиев

Члены комиссии:
профессор кафедры ОиСХ
кандидат химических наук, доцент

С.В. Дегтярев

профессор кафедры ОиСХ
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

А.П. Андреев



ГК «ПОЖНЕФТЕХИМ» • ООО «Пожнефтехим»

196006, Санкт-Петербург, Цветочная ул., д. 25, литера Ж, эт./пом. 1/1-Н,
оф. 105А (почтовый адрес: 196006, Санкт-Петербург, а/я 26)

+7 (812) 309 9109 • mail@pnx-spb.ru • www.pnx-spb.ru



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ТПК Пожнефтехим»
кандидат технических наук

С.А. Панов

2025 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
Битуева Рашида Борисовича на тему: «Параметры тушения пожара пролива
сжиженного природного газа высокократной пеной»

Комиссия в составе:

генерального директора ООО «ТПК Пожнефтехим» канд. техн. наук
Панова Сергея Александровича (председателя комиссии);заместителя генерального директора по развитию ООО «ТПК
Пожнефтехим» канд. техн. наук Потеряева Юрия Константиновича (заместителя
председателя комиссии);руководителя нормативно-технического отдела ООО «ТПК
Пожнефтехим» Титенкова Сергея Владимировича (члена комиссии);руководителя проекта производства пенообразователей ООО «ТПК
Пожнефтехим» канд. хим. наук Потапенко Татьяны Викторовныподтверждает, что результаты диссертационной работы Битуева Р.Б.
использовались при модернизации конструкции генераторов высокократной
пены, выпускаемых на ООО «ТПК Пожнефтехим» и применяемых для
локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного
природного газа в части оптимизации кратности пены для создания требуемой
толщины пенного слоя.**Комиссия:**

Председатель комиссии

С.А. Панов

Заместитель
председателя комиссии

Ю.К. Потеряев

Члены комиссии:

С.В. Титенков

Т.В. Потапенко