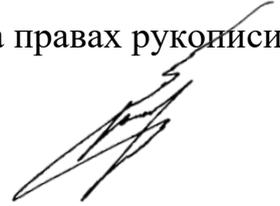


На правах рукописи



Тетерин Иван Александрович

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА
ГАЗОВОЗДУШНОГО ОБЛАКА ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА С УЧЕТОМ ЕГО СОСТАВА**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Сулименко Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: **Фомина Екатерина Евгеньевна**
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина», кафедра
промышленной безопасности и
охраны окружающей среды, профессор

Громов Николай Викторович
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», лаборатория
«Газодинамики и взрыва» научно-
исследовательского центра
«Взрывобезопасность» Института комплексной
безопасности в строительстве, заведующий

Ведущая организация: Санкт-Петербургский университет
ГПС МЧС России им. Героя Российской
Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева

Защита диссертации состоится «23» сентября 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/8be/dip54h2jhxfbias9e03tbet2nz0bk1z3/Диссертация%20Тетерина%20И.А..pdf>

Автореферат разослан «18» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Соковнин А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире изменяются центры потребления энергии. Согласно большинству прогнозов в ближайшие десятилетия увеличится спрос на природный газ, при этом сжиженная форма расширяет возможности его применения. Правительством Российской Федерации в 2021 г. утверждена долгосрочная программа развития производства сжиженного природного газа (СПГ) до 2035 года. Для достижения целей программы в 2021 г. утверждена «Дорожная карта» по развитию рынка малотоннажного СПГ и газомоторного топлива, в которой поставлены задачи перед МЧС России по проведению дополнительных исследований в области пожарной безопасности, направленных на смягчение требований к максимально допустимому объему хранения СПГ на малотоннажных объектах и автозаправочных станциях.

В соответствии со статьей 6 Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» пожарная безопасность объекта защиты считается обеспеченной при выполнении в полной мере требований данного Федерального закона, а также одного из пяти условий, в число которых входит отсутствие превышения пожарного риска, разработка специальных технических условий, стандартов организации. Оценка пожарного риска на производственных объектах до 1 января 2025 г. производилась по «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», утвержденной приказом МЧС России № 404 от 10 июля 2009 г. (Далее – Методика № 404). Однако в указанной методике отсутствовала классификация СПГ по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, что не позволяло корректно определять давление взрыва при аварийном выбросе СПГ.

Несмотря на то, что наиболее содержательным горючим компонентом СПГ является метан, согласно ГОСТ Р 57431-2017 (ИСО 16903:2015) «Газ природный сжиженный. Общие характеристики» для вычисления характеристик СПГ не следует использовать параметры чистого метана. Анализ литературных данных показал, что свойства природного газа, в частности, при определении детонационной стойкости газового моторного топлива, рассматривают по четырем основным горючим компонентам природного газа: метану, этану, пропану, бутану. Однако метан и его гомологи относятся к различным классам по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, а их содержание может варьироваться в зависимости от назначения СПГ по ГОСТ 34894–2022 «Газ природный сжиженный. Технические условия» (Далее – ГОСТ 34894).

Таким образом, актуальной стала задача по разработке методики, которая позволяет определять давление взрыва для различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ.

Степень разработанности темы исследования. Значение избыточного давления взрыва газоздушных смесей зависит от физико-химических и газодинамических свойств рассматриваемых смесей.

Экспериментальные зависимости давления взрыва от расстояния при

взрыве конденсированных веществ были получены Садовским М.А., зависимости для газообразных веществ определены Дорофеевым С.Б., которые и легли в основу нормативной методики. Научные основы внешних взрывов рассмотрены в монографии Гельфанда Б.Е. Разработкой альтернативных методик занимались Хуснутдинов Д.З., Комаров А.А.

Вопросы турбулизации фронта пламени изучали Абдурагимов И.М., Горев В.А., Мольков В.В., Соколик А.С., Щелкин К.И., Wang T.

Теорию протекания физико-химической реакции в пламени при его распространении формировали Семенов Н.Н., Кондратьев В.Н., Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А., Lewis B., Elbe G., Gardiner Jr., Benson S.W. Теория цепно-теплового распространения пламени развита в трудах Азатяна В.В., Копылова С.Н., Williams V.A. Процессам горения смеси алканов посвящены работы Арутюнова В.С., Парфенова Ю.В., Никитина А.В., Watson G.

Экспериментально взрывы природного газа в открытом пространстве изучали Карпов В.Л., Wang K. Непосредственно аварийные выбросы СПГ изучали Болодьян И.А., Шебеко Ю.Н., Marshall V.C., Yang S., Planas E., Wen J. Аналитический обзор аварий на объектах производства, хранения и перевозки СПГ, а также методик их оценки выполнен Сафоновым В.С.

Разработкой экспериментальных установок, позволяющих изучать взрывы горючих газов, в Академии ГПС МЧС России занимались Бегишев И.Р., Сулименко В.А.

Однако до настоящего времени, несмотря на обширные исследования в области теории горения и взрыва, не разработана методика, позволяющая рассчитать давление взрыва газозвдушного облака при аварийном выбросе СПГ с учетом его состава.

Цель диссертационной работы – разработка методики определения давления взрыва газозвдушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих методик определения давления взрыва газозвдушных смесей, выявить их недостатки, предложить теоретические пути решения проблем.

2. Проанализировать физико-химические особенности горения основных горючих компонентов СПГ.

3. Экспериментально исследовать влияние соотношения основных горючих компонентов СПГ на концентрационные пределы распространения пламени и давление взрыва газозвдушного облака.

4. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработать методику определения давления взрыва газозвдушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава, а также обосновать возможность применения методики с учетом турбулизации пламени.

Объектом исследования является процесс сгорания паров сжиженного природного газа при его аварийном выбросе.

Предмет исследования: давление взрыва газозвдушного облака при

аварийном выбросе сжиженного природного газа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– экспериментально установлена линейная зависимость изменения концентрационных пределов распространения пламени в смеси основных горючих компонент СПГ;

– экспериментально установлен аддитивный вклад основных горючих компонент СПГ на давление взрыва в близкой к стехиометрической смеси с воздухом.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

– получении зависимости изменения концентрационных пределов распространения пламени паров СПГ при различных соотношениях метан/этан/пропан/бутан/воздух;

– получении зависимостей изменения давления взрыва модельного состава паров СПГ при различных соотношениях метан/этан/пропан/бутан/воздух;

– экспериментальном подтверждении возможности применения правила Ле Шателье для определения концентрационных пределов распространения пламени паров СПГ с учетом его состава;

– разработке методики определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава;

– обосновании 3 класса по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов для наиболее взрывоопасного по составу сжиженного природного газа.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использовались методы математического моделирования и моделирования кинетики химических реакций, наблюдения, анализа, сравнения, определения эмпирических зависимостей на основе обработки экспериментальных данных, описания, обобщения.

Положения, выносимые на защиту:

– экспериментальные данные по аддитивному вкладу основных горючих компонент СПГ на давление взрыва в близкой к стехиометрической смеси с воздухом;

– линейная зависимость изменения концентрационных пределов распространения пламени различных смесевых композиций метан/этан/пропан/бутан/воздух;

– обоснование применения правила Ле Шателье для определения концентрационных пределов распространения пламени паров СПГ в смеси с воздухом;

– основные положения методики определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием в экспериментальных исследованиях современных поверенных

измерительных приборов и оборудования, обеспечивающих достаточную точность измерений. Внутренней непротиворечивостью результатов исследования и их согласованностью с данными других источников.

Материалы работы реализованы при:

– разработке «Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 (Далее – Методика № 533)). М.: ВНИИПО МЧС России, 2025 г.;

– проведении экспертной оценки риска для принятия ПАО НОВАТЭК работы по подготовке стандарта организации в части определения избыточного давления взрыва газовоздушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа. М.: ООО «ГИПРОНИИГАЗ-МП», 2024 г.;

– проведении практических занятий и лабораторных работ по дисциплинам «Теория горения и взрыва» и «Теоретические основы процессов горения и тушения пожара». М.: Академия ГПС МЧС России, 2024 г.

Основные результаты работы доложены на:

– I–IV Всероссийских научно-практических конференциях «Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы» (г. Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2021–2024 гг.);

– VI–VIII Международных научно-практических конференциях «Гражданская оборона на страже мира и безопасности» (г. Москва: АГПС МЧС России, 2022–2024 гг.);

– VIII, IX Международных научно-практических конференциях «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва: АГПС МЧС России, 2022, 2024 гг.);

– XIV–XVI Научно-практических конференциях «Экологические проблемы XXI века» (г. Москва: АГПС МЧС России, 2022–2024 гг.);

– 31-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2022» (г. Москва, АГПС МЧС России, 2022 г.);

– XXXV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2023 г.);

– 10th International Seminar on Flame Structure (г. Новосибирск, ИХКГ СО РАН, 2023 г.);

– 18-й Научной конференции по горению и взрыву (г. Москва, ФИЦ ХФ РАН, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, из них 7 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России, в том числе 2 – в изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, двух приложений. Содержание работы изложено на 177 страницах текста, включает в себя 97 таблиц, 46 рисунков, список литературы из 202 наименований, два приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Анализ существующих методик определения давления взрыва газовоздушных смесей» выполнен анализ литературных источников и реальных аварий с выбросом сжиженного углеводородного газа (СУГ) и СПГ, отмечены основные термодинамические отличия при авариях с данными газами, которые определяют сценарий распространения газовоздушного облака. При утечке из сосудов, работающих под давлением, или трубопроводов СПГ будет распыляться в атмосфере в виде струйных потоков с одновременным дросселированием (расширением) и испарением. Этот процесс сопровождается интенсивным перемешиванием паров СПГ с окружающим воздухом. Первоначально большая часть СПГ в паровом облаке будет содержаться в виде аэрозоля. В результате дальнейшего перемешивания СПГ с воздухом произойдет полное испарение мелких капель жидкости. Такой сценарий приведет к образованию над местом выброса газовоздушного облака, способного взорваться при наличии источника воспламенения, что подтверждается реальными авариями (рисунок 1).



Рисунок 1 – Взрыв расширяющегося облака паров СПГ

Выявлены недостатки в Методике № 404 по определению избыточного давления взрыва газовоздушных облаков при рассмотрении аварии с выбросом СПГ, в частности, отсутствует возможность дифференцированного определения значения избыточного давления взрыва в зависимости от процентного содержания основных горючих компонентов.

Также анализ показал, что для сценария аварийного выброса СПГ неопределенность вносит степень участия паров во взрыве (Z), однако данный показатель не является предметом исследования настоящей диссертации. В тоже

время в работе отмечено, что нормативный показатель Z равный 0,1 не является наиболее опасным, теоретически предлагается рассматривать степень участия равным 1 до проведения полноценных экспериментальных исследований.

Сжиженный природный газ в зависимости от назначения делится на три марки, минимальное содержание метана в которых может варьироваться от 75 до 99 % (таблица 1), другими основными горючими компонентами являются: этан, пропан, бутан.

Таблица 1 – Содержание метана в СПГ согласно ГОСТ 34894

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

Согласно Методике № 404, разработанной на основе результатов мировых и отечественных исследований, метан относится к 4 классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, а этан, пропан и бутан – ко 2 классу. В диссертации предложено аддитивно учитывать вклад каждого из горючих компонент СПГ на избыточное давление взрыва. Для этого целесообразно рассчитывать давление взрыва для каждого газа отдельно, предполагая, что его объем занимает всю смесь, а затем складывать полученные результаты в процентном соотношении:

$$\Delta P_{\text{смеси}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot \varphi_i / 100, \quad (1)$$

где ΔP_i – избыточное давление взрыва i -го горючего газа, найденное по Методике № 404, Па;

φ_i – процентное содержание i -го горючего в составе СПГ, % (об.).

Однако применение формулы (1) ограничено законами теплофизики и не учитывает процесс химической кинетики влияния метана и его гомологов друг на друга, а также влияние газодинамики. Для того, чтобы проверить применимость данной формулы с учётом цепно-тепловой природы протекания реакции горения, необходимо провести детальный кинетический анализ и экспериментальные исследования.

Так как возможность взрыва определяется концентрационными пределами распространения пламени (КПР), то в первой главе рассмотрены КПР сжиженного природного газа. Согласно нормативным документам КПР СПГ определяется по метану, что может существенно изменять пределы воспламенения. Продемонстрирован существенный вклад гомологов метана на КПР паров сжиженного природного газа для различных марок по правилу Ле Шателье, которое имеет следующий вид:

$$\varphi_{\text{нкпр.с}} = \frac{100}{\sum \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{нкпр.}i}} \right)}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{нкпр.с}}$ – нижний концентрационный предел распространения

пламени (НКПР) смеси газа, % (об.);

φ_i – концентрация i -го индивидуального газа в смеси, % (об.);

$\varphi_{\text{нкпр},i}$ – НКПР i -го индивидуального газа, % (об.).

Аналогичный расчет выполнен для верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР), при этом модельный состав для марок А и В разработан исходя из наихудшего сценария содержания метан в смеси, а для марки Б принято усредненное значение (таблица 2). Результаты расчетов представлены на рисунках 2 и 3.

Таблица 2 – Модельный состав горючих компонентов СПГ

Наименование индивидуального газа	Процентное содержание газа, % об.		
	Марка А	Марка Б	Марка В
Метан	99	85	75
Этан	1	10	16
Пропан	0	2,5	4,5
Бутан	0	2,5	4,5

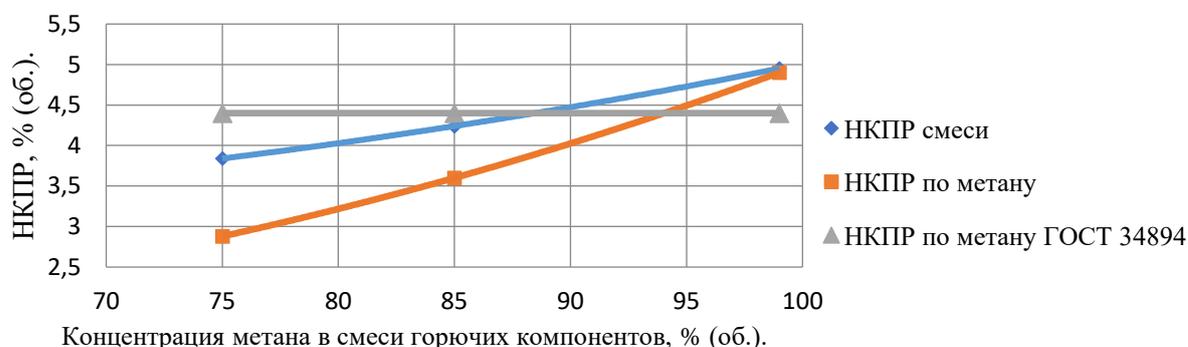


Рисунок 2 – Графики зависимостей НКПР от состава смеси

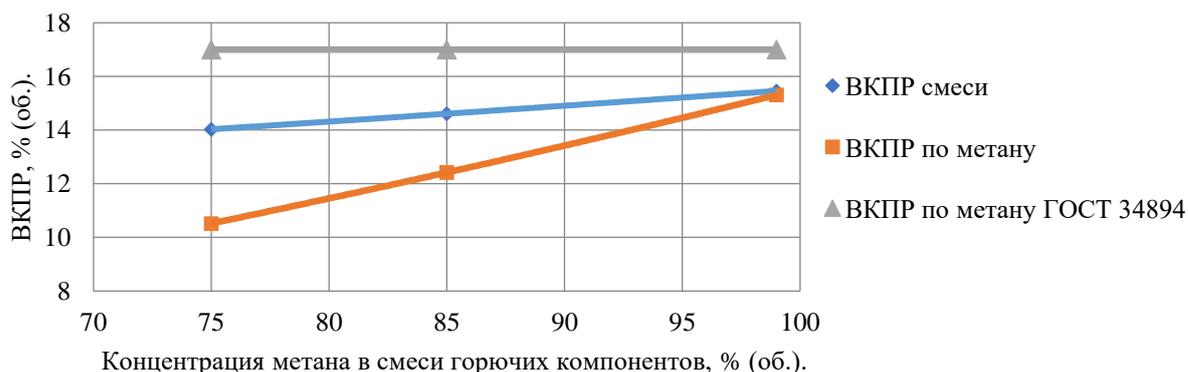


Рисунок 3 – Графики зависимостей ВКПР от состава смеси

Отмечено, что применение правила Ле Шателье для оценки КПР смеси легких алканов должно быть обосновано экспериментально, так как данное правило изначально было предложено для нижнего концентрационного предела, а в дальнейшем экстраполировано на верхний предел и не учитывает возможного химического влияния компонентов смеси друг на друга.

Во второй главе «Анализ физико-химических особенностей горения основных горючих компонентов сжиженного природного газа» изучены теплофизические и кинетические особенности горения легких алканов.

Представленный анализ обусловлен необходимостью обоснования проведения экспериментальных исследований с горючими газами одного гомологического ряда. Особенности высокотемпературного окисления основных горючих компонентов СПГ начинают проявляться при анализе предельной температуры горения ($T_{потухания}$), которая определена по теплосодержанию 1 моль продуктов сгорания ($H_{ср}$). Теплота сгорания (Q_H) для каждого газа рассчитана на основании закона Гесса ($V_{пр}$ – количество моль продуктов сгорания). Результаты расчета представлены в таблице 3. Температура потухания в ряду алканов имеет тенденцию к увеличению, однако этан не подчиняется данной зависимости (таблица 3). Такое различие находит свое объяснение в теории разветвленно-цепных реакций, что определило необходимость изучения свойств различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ исходя из анализа химической кинетики разветвленно-цепных реакций.

Таблица 3 – Теплофизические показатели в ряду легких алканов

Хим. формула	НКПР	Q_H , кДж/моль	$V_{пр}$, моль	$H_{ср}$, кДж/моль	$T_{потухания}$, °С (НКПР)
CH ₄	5,0	802,8	20	40,15	1139,77
C ₂ H ₆	2,5	1428,8	40,49	35,29	1064,62
C ₃ H ₈	2,1	2045,6	48,61	42,08	1240,04
C ₄ H ₁₀	1,8	2660,3	57,04	46,64	1353,74

Анализ химической кинетики представляет собой учет сотни элементарных реакций, многие из которых еще не полностью изучены, а отдельные реакции являются несущественными, при этом применение программных продуктов может приводить к значительным погрешностям. Согласно теории ошибок неточности параметров (среднеквадратичные ошибки) суммируются, следовательно в схеме из ста реакций, где каждая константа известна с точностью до одного процента, что на порядок выше реальной точности их определения, погрешность вычислений может достигать 100 %. Для того, чтобы построить схему, приближенную к реальному процессу горения, были выявлены наиболее вероятные реакции, которые вносят существенный вклад в разветвление цепи, согласно выражению:

$$P = \frac{k_a(T) \cdot [R_x] \cdot [R_a]}{\sum_i k_i(T) \cdot [R_x] \cdot [R_i]} \cdot 100, \quad (3)$$

где $k_a(T)$ – константа скорости соответствующего радикала;

$[R_x]$ – концентрация горючего компонента на соответствующей стадии расходования, % (об.);

$[R_a]$ – концентрации радикала ($\dot{H}/\dot{O}H/\dot{O}$) в реакции, % (об.);

$k_i(T)$ – константа скорости i -го радикала;

$[R_i]$ – концентрации i -го радикала ($\dot{H}/\dot{O}H/\dot{O}$), % (об.).

Используемое для расчета константы скорости химической реакции выражение имеет вид:

$$k(T) = A(T/298)^n e^{E_a/RT}, \quad (4)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, размерность для бимолекулярных реакций – молек/(см³·с), для тримолекулярных – молек²/(см⁶·с);

T – температура, К;

E_a – энергия активации элементарной реакции, кДж/моль;

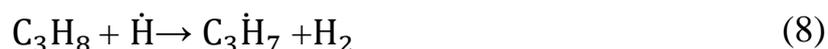
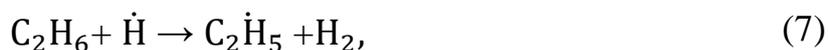
R – газовая постоянная, равная 8,314472·10⁻⁰³ кДж/моль·К.

Поиск исходных данных выполнялся в международной базе данных NIST (National Institute of Standards and Technology) и научных публикациях. Несмотря на большое количество возможных реакций, представленных в базе данных, не все содержат необходимую информацию для расчетов. Поэтому расчет выполнен для реакций, по которым имеются данные кинетических параметров. Так как радикалы \dot{O} , \dot{H} , $O\dot{H}$ являются наиболее реакционноспособными, то принимали во внимание реакции с этими радикалами.

Так как скорость разветвленно-цепного процесса определяется скоростью стадии разветвления реакционных цепей:



то реакции



способные в силу своих кинетических параметров эффективно конкурировать с реакцией (5), являются актами самоингибирования процесса горения углеводородов. При этом кинетические параметры реакций (6) и (7) таковы, что акт самоингибирования для окисления метана и этана протекает практически с одинаковой скоростью, а скорость протекания реакции (8) оказывается существенно выше, чем при реакциях (6) и (7).

Результаты кинетического анализа для метана (рисунок 4) и пропана (рисунок 5) по формуле 3 показывают, что радикал $C_3\dot{H}_7$ способен либо восстанавливаться при взаимодействии с атомарным водородом, либо приводить к образованию пропилена:



Пропилен способен весьма эффективно взаимодействовать с атомарным водородом, при этом регенерируя в реагирующей смеси, в результате самоингибирования при горении пропана оказывается значительно сильнее, чем для случая метана или этана. Причем акт самоингибирования проявляется более выражено в области богатых смесей, поэтому ингибирование горения метана должно быть выражено на верхнем пределе распространения пламени.

Таким образом, теоретические расчеты и анализ литературных данных физико-химических особенностей горения легких алканов показывают возможное химическое влияние компонентов СПГ друг на друга, что требует проведения детального экспериментального исследования.

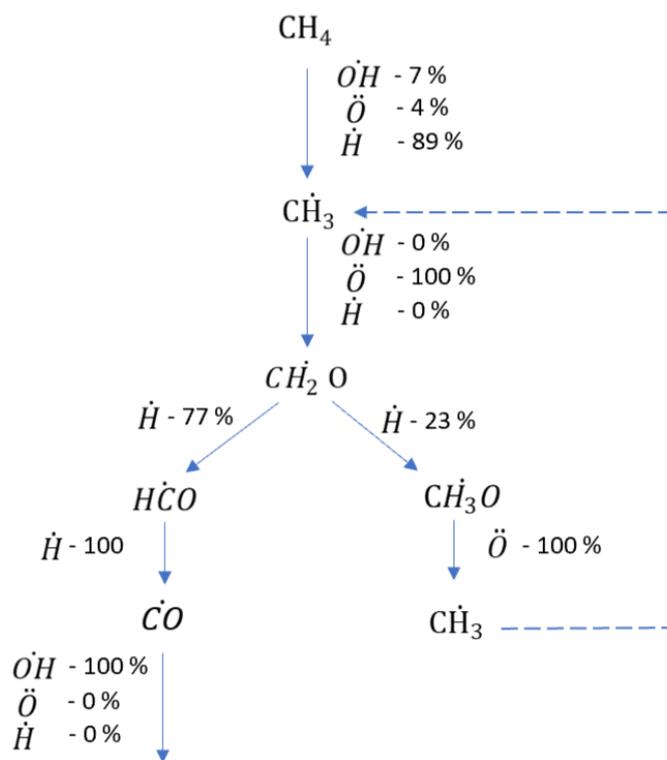


Рисунок 4 – Кинетическая схема горения метана (стехиометрия 1200 К)

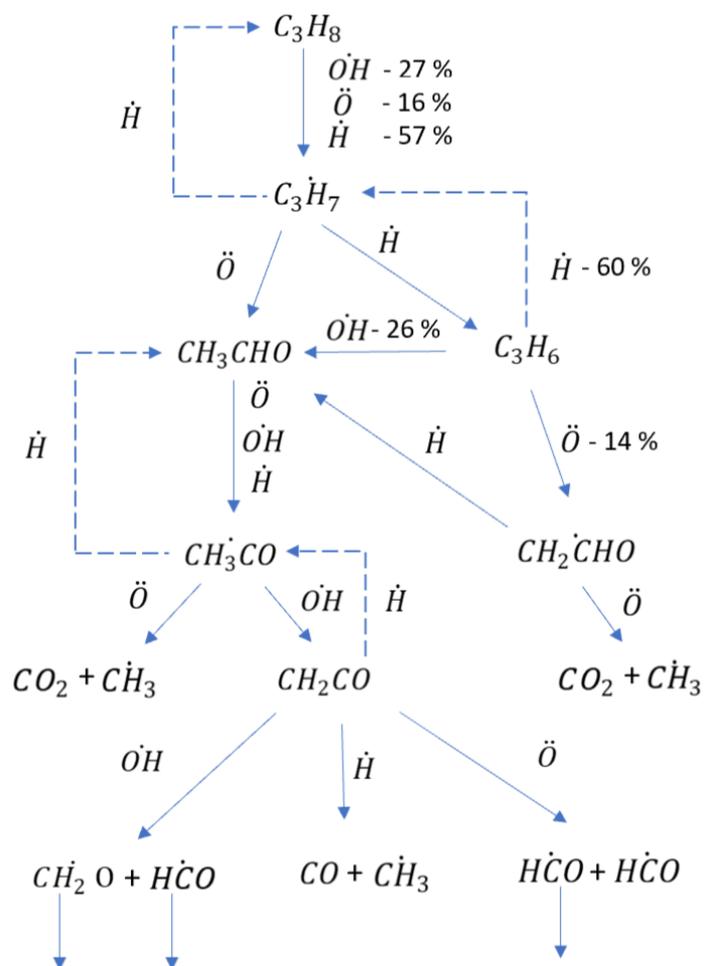


Рисунок 5 – Кинетическая схема горения пропана (стехиометрия 1200 К)

В третьей главе «Экспериментальное исследование взрывоопасности паров сжиженного природного газа» выполнены экспериментальные исследования влияния основных горючих СПГ на избыточное давление взрыва и концентрационные пределы распространения пламени. Серия экспериментов выполнена на установке «Вариант», соответствующей ГОСТ 12.1.044 ССБТ «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Установка предназначена для определения максимального давления взрыва газовоздушных смесей, ее конструктивные особенности позволяют определять КПР газовоздушных смесей.

Для различных соотношений смесей воздуха с метаном, этаном, пропаном, бутаном было определено максимальное давление взрыва. Результаты исследований согласуются с общеизвестным фактом регистрации максимального давления взрыва выше стехиометрии. Максимальное давление взрыва для метановоздушной смеси составило 676 кПа, для смеси пропан-бутан-воздух – 740 кПа, а этановоздушной смеси – 751 кПа.

Соотношения 85 % (об.) метана к 15 % (об.) пропан-бутана, 75 % (об.) метана к 25 % (об.) пропан-бутана, 53 % (об.) метана к 47 % (об.) пропан-бутана показали максимальные давления взрыва 679, 699 и 713 кПа соответственно. Соотношение метана 53 % (об.) к пропан-бутану 47 % (об.) было проверочным, чтобы подтвердить линейную зависимость для любых модельных составов природного газа. Все полученные значения подтверждены тройным повторением каждого из экспериментов.

Обобщенный график влияния примесей низкомолекулярных углеводородов на параметры взрыва метановоздушной смеси представлены на рисунке 6.

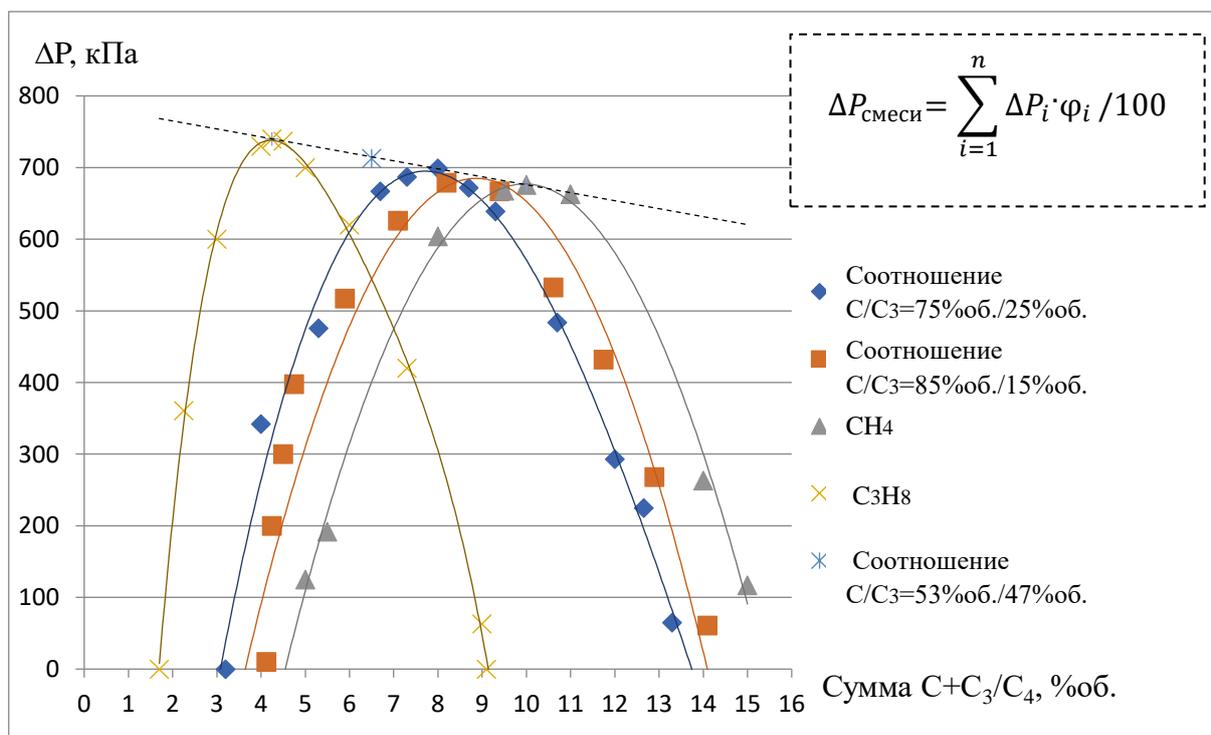


Рисунок 6 – Давление взрыва различных соотношений метан/пропан/бутан/воздух

Полученные результаты позволяют сделать вывод о линейной зависимости влияния примеси пропан-бутана на давление взрыва метановоздушной смеси. Аналогичные исследования с добавлением этана к смесям метан/пропан/бутан/воздух также подтвердили возможность аддитивного сложения максимального давления взрыва компонентов смеси. Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения формулы (1) для определения давления взрыва газовой воздушной смеси при аварийных выбросах СПГ с учетом его состава.

На рисунке 7 представлены экспериментально определенные концентрационные пределы распространения пламени для смеси метан/пропан/бутан/воздух. Кривые (3) и (4) построены по экспериментальным точкам НКПР и ВКПР соответственно. Соотношение пропана и бутана составляло 1:1. Кривые (1) и (2) обозначают верхний и нижний концентрационные пределы смеси соответственно, рассчитанные по правилу Ле Шателье.

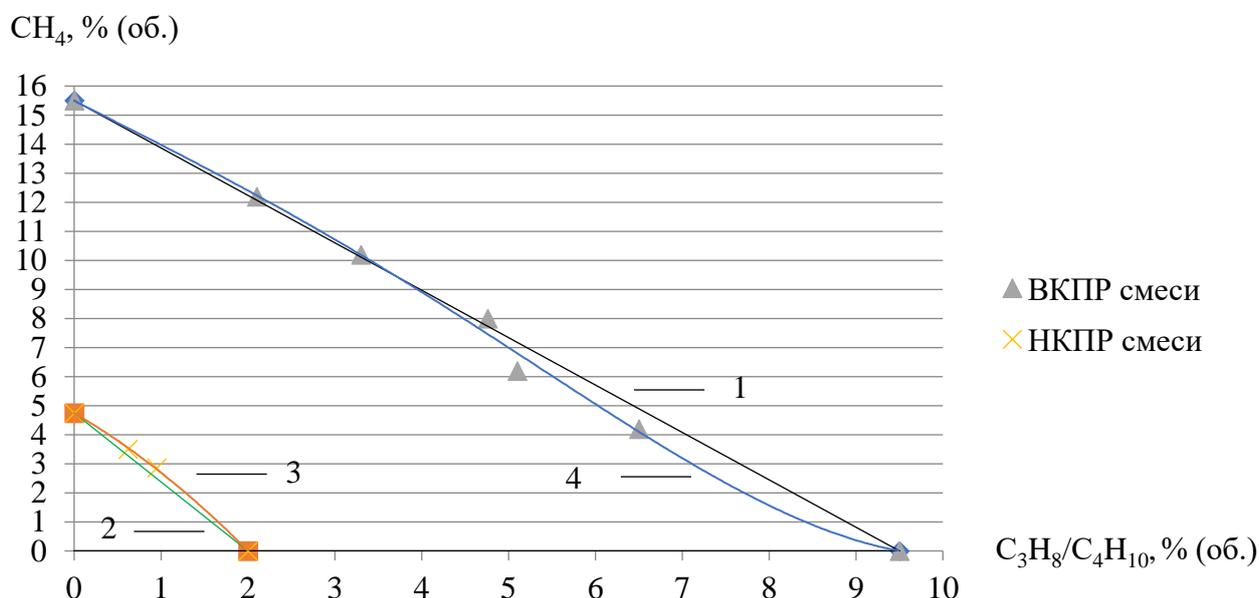


Рисунок 7 – Концентрационные пределы распространения пламени для различных соотношений метан/пропан/бутан/воздух

Также проведены исследования горения различных смесевых композиций метан/этан/пропан/бутан/воздух как основных горючих компонентов СПГ. Отклонения экспериментальных данных НКПР и ВКПР для данных смесей от ожидаемых расчетных, вычисленных по правилу Ле Шателье, не выходят за пределы погрешности.

Для смеси метан/этан/пропан/бутан/воздух при технических расчетах концентрационных пределов данными отклонениями можно пренебречь и руководствоваться правилом Ле Шателье. Однако для совершенствования способов обеспечения пожаровзрывобезопасности СПГ необходимы дальнейшие детальные исследования цепно-теплового механизма взаимодействия горючих компонентов.

С учетом обоснования возможности использования формулы (1),

предложена методика определения давления взрыва газовоздушного облака при аварийных выбросах СПГ с учетом его состава.

Основным условием применения данной формулы является необходимость расчета давления взрыва по каждому основному горючему компоненту для всей массы СПГ, участвующей во взрыве, так как дальность достижения давления взрыва определяется энергозапасом смеси, который связан с массой горючего газа.

Так как этан, пропан и бутан относятся к одному классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, то их можно привести к одному веществу и тогда формула (1) будет рассматриваться для двух давлений взрывов.

Исходя из вышеизложенного методика принимает следующую последовательность действий:

1. По лабораторным данным или нормативным показателям определяется процентное содержание метана в составе СПГ – данная составляющая относится по метану к 4 классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов. Вся остальная составляющая СПГ относится по основным горючим гомологам метана ко 2 классу.

2. Согласно методике определения избыточного давления взрыва для индивидуальных газов, изложенной в Методике № 533, определяется давление взрыва для 2 класса и 4 класса отдельно всей массы заданного СПГ по формуле:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0, \quad (11)$$

где P_x – безразмерное давление;

P_0 – атмосферное давление, Па.

Безразмерное давление для 2-6 классов режима сгорания облака определяется исходя из следующего выражения:

$$P_x = \left(\frac{u^2}{C_0^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right), \quad (12)$$

где u – видимая скорость фронта пламени, м/с;

C_0 – скорость звука в воздухе, м/с;

σ – степень расширения продуктов сгорания;

R_x – безразмерное расстояние.

Безразмерное расстояние находится по формуле:

$$R_x = R \cdot \sqrt[3]{\frac{P_0}{E}}, \quad (13)$$

где R – расстояние от центра облака, м;

E – эффективный энергозапас смеси, Дж.

3. Выполняется процентное суммирование полученных избыточных давлений взрыва согласно процентному соотношению 2 и 4 класса, определённых в 1 пункте.

В качестве примера для модельных составов СПГ (см. таблицу 2), с

учетом отнесения их к 4 классу (по метану) и к 3 классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, выполнен соответствующий расчет максимального давления взрыва, результаты которого представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Максимальное избыточное давление взрыва при выбросе 18 м³ различных марок СПГ (Z=0,1)

Класс загроможденности	Максимальное избыточное давление взрыва ΔP_{max} , кПа				
	4 класс Методика № 533	Марка А	Марка Б	Марка В	3 класс Методика № 533
4	12,2	12,4	16,1	18,6	34,2
3 (Методика № 404)	33,3	33,8	41,2	46,4	36,9
3 (Методика № 533)	20,8	21,4	30,2	36,4	36,9
2	37,0	38,9	66,1	85,5	83,0
2 (нижняя граница скорости)	37,0	37,4	43,9	48,5	83,0

Следует отметить, что в процессе написания диссертации утверждена Методика № 533 взамен Методики № 404, поэтому расчеты выполнены с учетом внесенных в нее изменений по ограничению скорости для 5 и 6 классов нижней границей 4 класса ожидаемого режима сгорания газозвдушного облака.

Расстояния, на которых достигается значение избыточного давления взрыва 5 кПа представлены в таблице 5, а для 4 класса загроможденности пространства – отображены также на рисунке 8.

Таблица 5 – Расстояния, на которых достигается избыточное давление взрыв 5 кПа при выбросе 18 м³ различных марок СПГ (при Z=0,1)

Класс загроможденности	Расстояние (м), где $\Delta P=5$ кПа				
	4 класс Методика № 404	Марка А	Марка Б	Марка В	3 класс Методика № 404
4	130	134	180	212	405
3 (Методика № 404)	388	395	489	556	439
3 (Методика № 533)	236	244	353	432	439
2	433	457	794	1037	1009
2 (нижняя граница скорости)	433	439	522	582	1009

Из расчетов видно, что максимальное давление взрыва для всех марок СПГ, полученное по дифференцированной методике, находится в границах 3 класса по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов. Исключение составляет случай, когда рассматривается 3 класс загромождённости пространства в Методике № 404. С учетом внесенных изменений в Методике № 533 такое несоответствие перестает иметь место.

Также наблюдается незначительный выход полученных значений за границу 3 класса по степени чувствительности при рассмотрении 2 класса загромождённости для марки В. Однако модельный состав марки В принят исходя из наихудшего сценария, поэтому разница между значениями, полученными по разработанной методике и по 3 классу Методики № 533, не

представляет существенного различия при обеспечении безопасности.

Аналогичная ситуация проявляется при рассмотрении расстояния, где достигается избыточное давление взрыва 5 кПа.

Указанное обстоятельство позволяет рассматривать 3 класс как наиболее опасный в случае аварийных выбросов СПГ. Однако из экономических соображений целесообразно применять разработанную методику, учитывающую состав СПГ. Также можно заметить, что для марки А практически отсутствует необходимость отнесения СПГ к 3 классу, поскольку отклонение от 4 класса является незначительным. Следовательно, данную марку объективно определять по 4 классу.

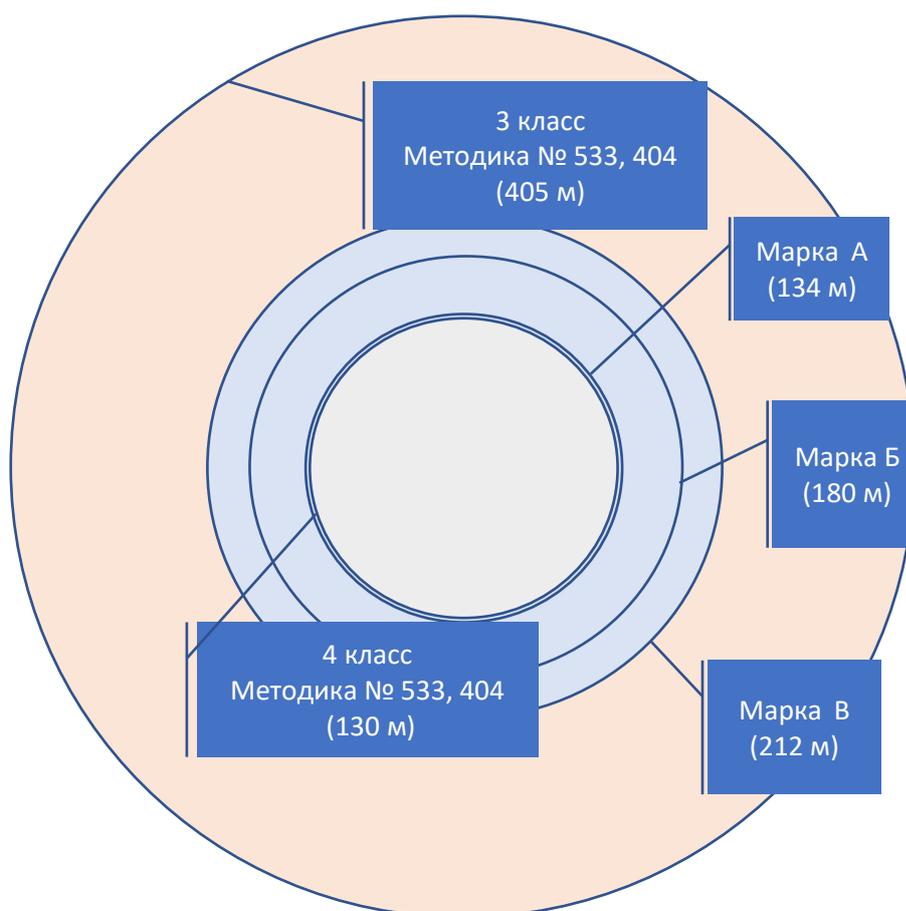


Рисунок 8 – Границы достижения избыточного давления взрыва 5 кПа при выбросе 18 м³ различных марок СПГ (4 класс загроможденности пространства, Z=0,1)

В четвертой главе «Влияние газодинамических особенностей распространения пламени на давление взрыва паров сжиженного природного газа» теоретически и экспериментально исследовано влияние турбулизации на изменение избыточного давления взрыва различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ.

Анализ литературных данных показал, что влияние турбулизации на значение избыточного давления взрыва может быть оценено по критерию Рейнольдса. Так как этан по своим газодинамическим свойствам близок к метану, то числа Рейнольдса определялись для различных процентных соотношений метан/пропан/воздух, что будет соответствовать предельно

возможному состоянию системы. По стехиометрическому соотношению окислителя и горючих компонент рассчитаны процентные содержания реагирующих смесей и продуктов сгорания различных соотношений метан/пропан/воздух (таблица 6).

Таблица 6 – Процентное содержание исходных компонентов и продуктов сгорания при различных соотношениях горючего CH_4/C_3H_8

Соотношение CH_4/C_3H_8	Исходные компоненты, % (об.)				Продукты горения, % (об.)		
	C_3H_8	CH_4	$CH_4 + C_3H_8$	Воздух	CO_2	H_2O	N_2
100/0	0	9,51	9,51	90,49	9,51	19,01	71,48
80/20	1,49	5,98	7,47	92,53	9,93	18,31	71,76
60/40	2,47	3,69	6,16	93,84	10,36	17,61	72,04
50/50	2,83	2,83	5,66	94,34	10,57	17,26	72,18

С учетом данных в таблице 6, справочной информации по значениям динамической вязкости, плотности, заданных скоростей распространения пламени и гидравлического диаметра препятствия, рассчитаны числа Рейнольдса для исходных смесей и их продуктов сгорания по формуле:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu}, \quad (14)$$

где u – характерная скорость, м/с;

D – гидравлический диаметр, м;

ν – кинематическая вязкость среды, m^2/c .

Установлено, что изменение числа Рейнольдса при изменении исследуемых соотношениях метан/пропан/воздух носит линейный характер, следовательно, изменение давления взрыва в смесевых композициях основных горючих компонентов СПГ также должно носить линейный характер при турбулизации фронта пламени.

Подтверждение теоретических расчетов осуществлялось на установке для изучения дефлаграционных взрывов. Взрывокамера представляет собой прямоугольный сосуд высотой 0,14 м, шириной 0,14 м и длиной 1,19 м. С торца имеется створка, зафиксированная на шарнирах в верхней части сосуда, что позволяет удерживать в сосуде горючий газ до момента воспламенения, а после воспламенения – свободно открываться под избыточным давлением. Фиксация параметров давления производилась двумя датчиками давления модели Honeywell Acton MA 01720 с погрешностью измерения не более 1 %, которые располагались в начале и в конце взрывокамеры. Концентрации газов задавались дозирующим устройством.

Предварительно на бинарных смесях горючего с окислителем были определены преграды, приводящие к наибольшему увеличению давления взрыва. В результате для дальнейших исследований были выбраны полые преграды круглого сечения диаметром 20 мм.

Достижение поставленной цели осуществлялось путем изменения процентного содержания примесей пропан-бутана (20 и 60 %) к метану. Так как равномерное перемешивание горючих компонентов с воздухом во взрывокамере

затруднено, то производилось варьирование времени задержки воспламенения и скорости подачи горючего газа в сосуд. Для всех соотношений горючих компонент выбирались максимальные значения избыточного давления взрыва (рисунок 9).

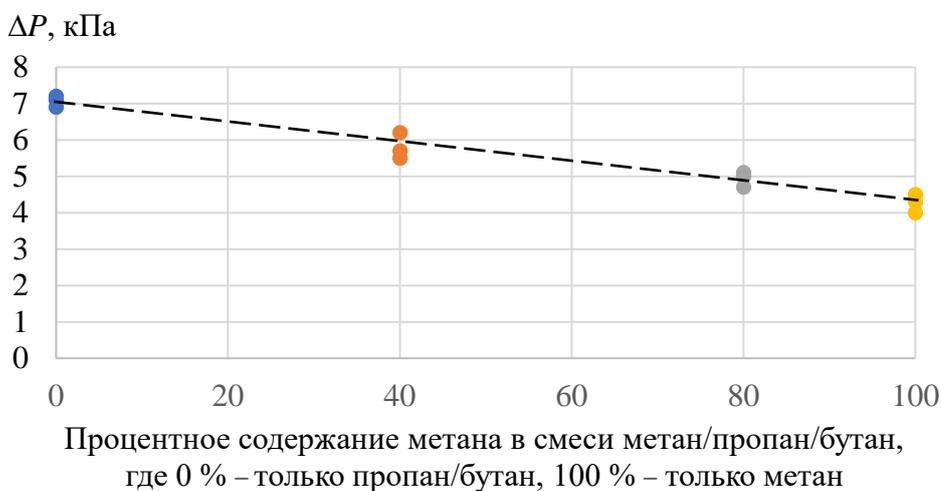


Рисунок 9 – Влияние преграды на избыточное давление взрыва различных составов смеси метан/пропан/бутан/воздух

Из рисунка 9 видно, что изменение избыточного давления взрыва носит линейный характер, а значит, разработанная методика может быть применена с учетом турбулизации пламени. Кадры характерного распространения фронта пламени для различных соотношений алканов с воздухом представлены на рисунках 10 и 11.

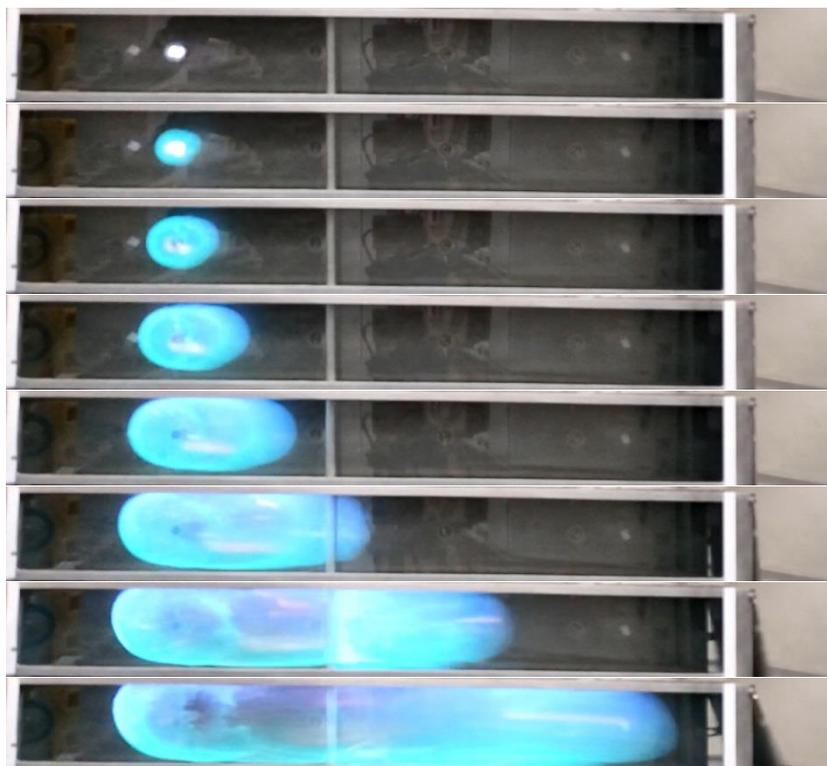


Рисунок 10 – Распространение фронта пламени в смеси пропан/бутан/воздух



Рисунок 11 – Распространение фронта пламени в смеси метан/воздух

Исследования по влиянию препятствий на значение давления взрыва газозвушной смеси показали сложный взрывной процесс. Детальное рассмотрение кадров видеосъемки распространения пламени показало, что фронт пламени при достижении преграды снижает интенсивность свечения, а уже после его дальнейшего распространения наблюдается воспламенение в объеме. Данный факт говорит о том, что процесс турбулизации приводит к перемешиванию свежей смеси с продуктами сгорания (в том числе с радикалами), а далее к воспламенению в объеме. То есть процесс не может быть рассмотрен только с позиции поверхностно-ламинарного горения. Специфическим в данном случае является сценарий выброса продуктов сгорания из замкнутых помещений в открытое пространство с наличием газозвушной смеси, что приводит к перемешиванию продуктов сгорания со свежей смесью и воспламенению в объеме смеси. Такие сценарии требуют дополнительного исследования для различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ.

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы. **В приложениях** представлены акты внедрения результатов диссертационной работы, таблица предэкспоненциальных множителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ литературных источников и реальных аварийных выбросов СПГ показал направления совершенствования Методики № 404. Предложено рассматривать взрывоопасные свойства СПГ по свойствам основных горючих

компонентов: метану, этану, пропану и бутану.

2. Анализ физико-химических особенностей горения смесевых композиций легких алканов показал возможность ингибирования горения метана примесями пропана, что определило направления экспериментальных исследований.

3. Впервые экспериментально исследованы взрывоопасные свойства СПГ по свойствам смеси основных горючих компонентов. Экспериментальные исследования подтвердили возможность применения правила Ле Шателье для определения концентрационных пределов распространения пламени паров СПГ в смеси с воздухом. Выявлено незначительное отклонение концентрационных пределов от расчетного по правилу Ле Шателье только в области верхнего концентрационного предела распространения пламени для составов метан/пропан/бутан/воздух, где процентное содержание пропан-бутана более 50 %. Экспериментально установлен аддитивный вклад основных горючих компонент СПГ на давление взрыва в близкой к стехиометрической смеси с воздухом.

4. На основании аддитивного вклада основных горючих компонент СПГ на давление взрыва разработана методика определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава, применение которой теоретически и экспериментально подтверждено при турбулизации пламени. Расчеты по разработанной методике позволили отнести марку А сжиженного природного газа к 4 классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, а наиболее опасный состав СПГ отнести к 3 классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов.

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

1. **Тетерин, И.А.** Неопределённости расчёта параметров взрыва газоздушного облака при аварийном выбросе сжиженного природного газа в открытом пространстве [Текст] / И.А. Тетерин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 1. – С. 44–50.

2. **Тетерин, И.А.** Влияние состава сжиженного природного газа на концентрационные пределы распространения пламени [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 2. – С.34–40.

3. **Тетерин, И.А.** Определение параметров взрыва метановоздушного облака с учётом формы преград [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Технологии техноферной безопасности. – 2023. – Вып. № 3 – (101). – С. 37–48.

4. **Тетерин, И.А.** Прогнозирование параметров взрыва паров сжиженного природного газа с учетом начальной температуры [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 11 – С. 27–33.

5. **Тетерин, И.А.** Газодинамические особенности взрывного горения паров сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко,

А.В. Волкова // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. – 2025. – № 1. – С. 32–39.

В том числе в изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus:

6. **Тетерин, И.А.** Концентрационные пределы распространения пламени сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 1. – С. 21–27.

7. **Тетерин, И.А.** Определение взрывоопасности сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 8. – С. 70–76.

Остальные публикации по теме диссертации:

1. Сулименко, В.А. Влияние аэродинамических характеристик преград на параметры взрыва газовойоздушной смеси [Текст] / В.А. Сулименко, **И.А. Тетерин** // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 3. – С. 56–62.

2. **Тетерин, И.А.** Исследование параметров горения сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. М.: АГПС МЧС России. – 2022. – С.7–12.

3. Сулименко, В.А. Влияние давления сжиженного природного газа внутри замкнутого сосуда на параметры взрыва газовойоздушной смеси [Текст] / В.А. Сулименко, **И.А. Тетерин** // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» в 2 ч. Ч. 1. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2022. – 392 с.

4. Сулименко, В.А. Формирование взрывоопасного облака при аварийном выбросе сжиженных углеводородов в условиях пожара [Текст] / В.А. Сулименко, **И.А. Тетерин** // Материалы тридцать первой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2022». – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2022. – 573 с.

5. **Тетерин, И.А.** Влияние преград на параметры взрыва сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин, Сулименко В.А. // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы : II Всероссийская научно-практическая конференция : тезисы докладов – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2023. – С. 75-78.

6. **Тетерин, И.А.** Влияние начальной температуры газовойоздушной смеси на параметры взрыва [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Гражданская оборона на страже мира и безопасности» Ч. II – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2023. – 447 с.

7. **Тетерин, И.А.** Определение параметров взрыва смеси горючих газов [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Гражданская оборона на страже мира и безопасности» Ч. II – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2023. – 447 с.

8. **Тетерин, И.А.** Определение взрывобезопасных зон при эксплуатации

сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Ройтмановские чтения: Сборник материалов XI научно-практической конференции. – М.: АГПС МЧС России. – 2023. – С. 68–70.

9. **Тетерин, И.А.** Влияние горючих примесей на распространение пламени паров сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Материалы XII международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2023» М.: Академия ГПС МЧС России. – 2023. – № 12. – С. 17–21.

10. **Тетерин, И.А.** Оценка взрывопожарной опасности объектов малотоннажного сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко, Д.Л. Блинов // Материалы XV Научно-практической конференции «Экологические проблемы XXI века» – М.: АГПС МЧС России. – 2023 г. С. 6–8.

11. **Тетерин, И.А.** Параметры взрыва метановоздушного облака с учетом формы преград [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Международной научно-практической конференции М.: ВНИИПО МЧС России. – 2023. – С. 430–432.

12. **Тетерин, И.А.** Концентрационные пределы распространения пламени этана [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Международной научно-практической конференции М.: ВНИИПО МЧС России. – 2023. – С. 478–483.

13. Kopylov, S.N. Experimentally observed double criticality in combustion of premixed gaseous mixtures / S. N. Kopylov, P. S. Kopylov, **I.A. Teterin** // 10th International Seminar on Flame Structure, Novosibirsk, October 10th, 2023 – 101 с.

14. **Тетерин, И.А.** Прогнозирование избыточного давления взрыва облака паров СПГ в открытом пространстве [Текст] / И.А. Тетерин [и др.] // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы : III Всероссийская научно-практическая конференция : тезисы докладов – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина – 2023. – С. 229–234.

15. **Тетерин, И.А.** Влияние загроможденности на избыточное давление взрыва паров сжиженного природного газа [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Гражданская оборона на страже мира и безопасности»: в 5 ч. Ч. III – М.: Академия ГПС МЧС России, 2024. – 390 с.

16. **Тетерин, И.А.** Особенности изменения давления взрыва легких алканов [Текст] / И.А. Тетерин, П.С. Копылов, С.Н. Копылов // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Гражданская оборона на страже мира и безопасности»: в 5 ч. Ч. III – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2024. – 390 с.

17. **Тетерин, И.А.** Влияние состава сжиженного природного газа на моделирование аварийного сценария [Текст] / И.А. Тетерин, П.С. Копылов, С.Н. Копылов // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы IX Международной научно-практической конференции. Ч. 1. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2024. – 350 с.

18. **Тетерин, И.А.** Расчет параметров формирования облака паров сжиженного углеводородного газа [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко, Э.Э. Первенов //

Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы IX Международной научно-практической конференции. Ч. 1. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2024. – 350 с.

19. Копылов, С.Н. Экспериментально наблюдаемая двойная критичность при горении перемешанных газовых смесей [Электронный ресурс] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, **И. А. Тетерин** // Proceedings of the 10th international seminar on flame structure, Novosibirsk, 09–13 октября 2023 года. – Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023. – С. 99–109. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61072414> (дата обращения 11.07.2024).

20. **Тетерин, И.А.** Анализ нормативно-правовой базы по определению взрывоопасности сжиженного природного газа с учетом мирового опыта [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов : сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России. – 2024. – 530 с.

21. **Тетерин, И.А.** Нормативно-правовые особенности определения давления взрыва при аварийном выбросе СПГ [Текст] / И.А. Тетерин, В.А. Сулименко // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы : Тезисы докладов IV Всероссийской научно-практической конференции. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2024. – С. 68–72.

Подписано в печать 10.06.2025. Формат 60×84¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 167.

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