

На правах рукописи



ПЕРМЯКОВ АРСЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПОСОБА ТУШЕНИЯ ПОЖАРА  
НА ГАЗОПРОВОДАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.26.03– Пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа - 2019

Работа выполнена на кафедре «Пожарная и промышленная безопасность» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор химических наук, старший научный сотрудник

**Султанов Рифкат Мухатьярович**

Официальные оппоненты:

**Калач Андрей Владимирович**

доктор химических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» / кафедра «Техносферная и пожарная безопасность», профессор

**Симонова Марина Александровна**

кандидат технических наук, доцент,  
подполковник внутренней службы  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы» / кафедра «Пожарная безопасность технологических процессов и производств», начальник кафедры

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (г. Москва).

Защита состоится «28» ноября 2019 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Латыпов Олег Ренатович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Повреждения газопроводов низкого давления рассматривается как особо опасное аварийное состояние, связанное с выбросом большого количества газа и образованием горючей среды на большой площади, называемой пожароопасной зоной. Эта зона в зависимости от диаметра газопровода, давления газовой смеси, метеорологических условий и рельефа местности может распространяться на существенные расстояния от газопровода. Появление в этой зоне источника зажигания приводит к воспламенению паро- и газовой смеси. На сильно загазованной территории может произойти взрыв.

Тушение пожаров на газопроводах представляет собой сложный процесс, который занимает продолжительное время. Кроме того, газопроводы низкого давления имеют развитую сеть и могут располагаться в жилых, административных, общественных и складских зданиях. В зависимости от места расположения газопровода пожар может привести к значительному социальному и материальному ущербу. В связи с этим актуальной темой является разработка новых быстродействующих способов тушения пожара на газопроводах, в том числе с применением электрического поля высокой напряженности.

### **Степень разработанности темы**

К моменту начала работы над диссертацией в российских и зарубежных периодических изданиях публиковались результаты работ по исследованию пламени горения различных горючих материалов: древесины, спиртовой горелки и т.д. при наложении электрического поля высокой напряженности такими авторами, как: Абриков С.А., Гуляев Г.А., Дьячков Б.Г., Исаев Н.А., Попков Г.А., Степанов Г.М., V.N. Ganguly, L.P.H. de Goeij, J. Lauton, S.D. Marcum, A.V. Serpan и др. Исследования, направленные на изучение тушения пламени электрическим полем,

проводились следующими авторами: Дудышев В.Д., Масляков М.Д., Башаричев А.М., Кропотова Н.А. Несмотря на крупные достижения упомянутых выше ученых ими не были проведены исследования по тушению электрическим полем горючих углеводородных газов, подаваемых под давлением.

В связи с этим, до настоящего времени исследования по тушению пожаров на газопроводах электрическим способом не проводились.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формулам специальности 05.26.03 Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль): – «исследование и разработка средств и методов, обеспечивающих снижение пожарной и промышленной опасности технологических процессов, предупреждения пожаров и аварий, тушения пожаров» (п.6); - «научное обоснование принципов и способов обеспечения промышленной и пожарной безопасности на предприятиях промышленности, строительства и на транспорте» (п.3).

### **Цель работы**

Разработка способа и оценка влияния электрического поля высокой напряженности на пламенное горение углеводородов при пожарах на газопроводах низкого давления.

На основании вышеизложенного определены основные **задачи исследования:**

1 Исследование и обоснование возможности применения электрического поля высокой напряженности в качестве способа тушения пожаров газопроводов низкого давления.

2 Предложение технического решения по конструкции лабораторной установки пожаротушения на основе генератора высокого напряжения, позволяющую гасить открытое пламя на модели газопровода с помощью электрического поля высокой напряженности.

3 Экспериментальные исследования по тушению пламени с помощью экспериментального генератора, создающего электрическое поле высокой напряженности, на модели газопровода с изменяемыми параметрами (давление газа, диаметр отверстия, площадь электродов).

4 Разработка способа ликвидации открытого горения газопровода с применением электрического поля.

Объект исследования: пламя при пожарах на газопроводах, установка тушения пожаров электрическим полем высокой напряженности и модель газопровода.

Предмет исследования: механизм огнетушащего воздействия электрического поля высокой напряженности на пламя углеводородов.

### **Научная новизна**

На основе экспериментальных исследований процесса тушения пламени модели газопровода электрическим полем выявлены закономерности между напряжением гашения и межэлектродным расстоянием, зависящие от давления газовой смеси, диаметра отверстия и площади электродов. Установлено, что при увеличении межэлектродного расстояния на 1 см, требуемое напряжение гашения возрастает и находится в диапазоне 1,37–1,71 кВ.

Результаты исследований позволили предложить уравнение для определения минимальной энергии электрического поля для тушения пламени углеводородов, в результате чего определена величина минимального напряжения гашения.

**Теоретическая значимость работы** заключается в исследовании и установлении закономерностей влияния электрического поля на пламя модели газопровода, разработке предложений и исходных данных для разработки технического задания на создание технических средств для тушения пожаров на газопроводах низкого давления электрическим полем высокой напряженности.

Научно-методологические основы тушения горючих газов можно использовать при разработке планов и карточек тушения для газопроводов низкого давления.

### **Практическая значимость работы**

Результаты исследований используются в учебном процессе кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» ФГБОУ ВО «УГНТУ», а именно:

- для бакалавров по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» по профилям «Пожарная безопасность», «Пожарная и промышленная безопасность»
- для специалистов по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность»;
- для магистров по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность» по программе «Системы техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли».

### **Методология и методы исследования**

Для достижения цели и решения поставленных задач осуществлен комплексный подход к исследованиям, состоящий из натуральных экспериментов, а также методов математического моделирования с применением программного комплекса Elcut Студенческий 6.3.2, а также методов прямых и косвенных измерений. Для обработки и оценки результатов экспериментальных исследований применялись методы математического анализа (метод Монте-Карло, трехпараметрическая регрессия).

### **Положения, выносимые на защиту**

1 Научно-методологическое обоснование применимости способа тушения пожара газопроводов низкого давления электрическим полем высокой напряженности.

2 Результаты экспериментальных исследований по тушению пламени на модели газопровода электрическим полем высокой напряженности.

3 Новое техническое решение по реализации технологии тушения реальных пожаров на газопроводах электрическим полем высокой напряженности.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность и обоснованность полученных при проведении исследований результатов и выводов подтверждается методами измерения, прямыми и косвенными, методами математического анализа, а также сходимостью результатов лабораторных исследований и масштабирования с доверительной вероятностью 95%.

Основные результаты проведенных исследований докладывались:

- на 64-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2013 г.);
- на X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники-2017» (Уфа, 2017г.);
- на I Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли» (Уфа, 2018 г.).

## **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы, приложения. Содержание диссертации изложено на 137 страницах, включая 72 рисунка, 51 таблицу, список литературы из 121 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертационной работы. Изложен анализ статистики пожаров на газопроводах низкого давления за период 2010–2017 гг. Описаны основные

причины, приводящие к пожарам. Выполнен обзор существующих способов и средств тушения пожаров на газопроводах.

Анализ существующих способов и средств тушения пожаров на газопроводах показал, что основным способом тушения является отделение пламени водным слоем от газа с помощью автомобилей газо-водяного тушения. Основной недостаток, применяемых способов тушения на практике, заключается в продолжительном времени воздействия огнетушащего вещества на пламя.

В исследуемом способе тушения в качестве огнетушащего вещества выступает электрическое поле, воздействие которого на очаг горения приводит к гашению пламени за время, не превышающее нескольких секунд, что является существенным преимуществом перед применяемыми способами. Еще одно преимущество этого способа заключается в возможности его автономного использования.

Описаны теоретическая модель воздействия электрического поля на пламя и свойства плазмы. Электрические свойства пламени обусловлены существованием в них заряженных частиц - ионов и электронов. Ионы в пламени образуются в результате химической ионизации в реакции с участием радикалов  $C_2$ ,  $CH$ ,  $OH$ .

**Во второй главе** предложена и описана принципиальная схема использования генератора электрического поля высокой напряженности для проведения экспериментальных исследований. Воздействие на пламя может быть осуществлено двумя путями: наложением на пламя электрического поля или введением в пламя заряженных частиц извне.

В качестве основы для исследований выбран путь, заключающийся в наложении на пламя электрического поля. Для осуществления наложения электрического поля высокой напряженности на пламя рассчитана и смонтирована установка, состоящая из генератора электрического поля и модели газопровода. Конструкция установки и характеристики электрического оборудования подбирались опытным путем исходя из

оптимального воздействия электрического поля на пламя, а также основываясь на теоретических данных об электрической напряженности пламени.

Порядок проведения исследований на экспериментальной установке состоит в следующем (Рисунок 1): к газовому баллону подключается металлическая трубка через газовый редуктор, вокруг свободного конца трубки устанавливается два металлических электрода, представляющие собой две медные металлические пластины толщиной 1 мм площадью 25 – 50 см<sup>2</sup>. После подачи газа на выходе трубки поджигается газовая смесь, в результате чего между электродами образуется пламя. Далее постепенно (с шагом в 100 В) увеличивается напряжение на генераторе электрического поля от 0 В до того момента, пока пламя под действием электрического поля не распадется. Напряжение, при котором произошло гашение пламени, называется напряжением гашения. Технические параметры генератора электрического поля и параметры проведенных опытов сведены в Таблицу 1. Параметры модели газопровода приведены в Таблице 2.

Анализ предварительных исследований по оценке точности измерений генератора (абсолютная погрешность), позволяет описать эффективность его работы. Результаты анализа приведены в Таблице 3.

Таблица 1 – Технические характеристики генератора электрического поля и параметры модели газопровода

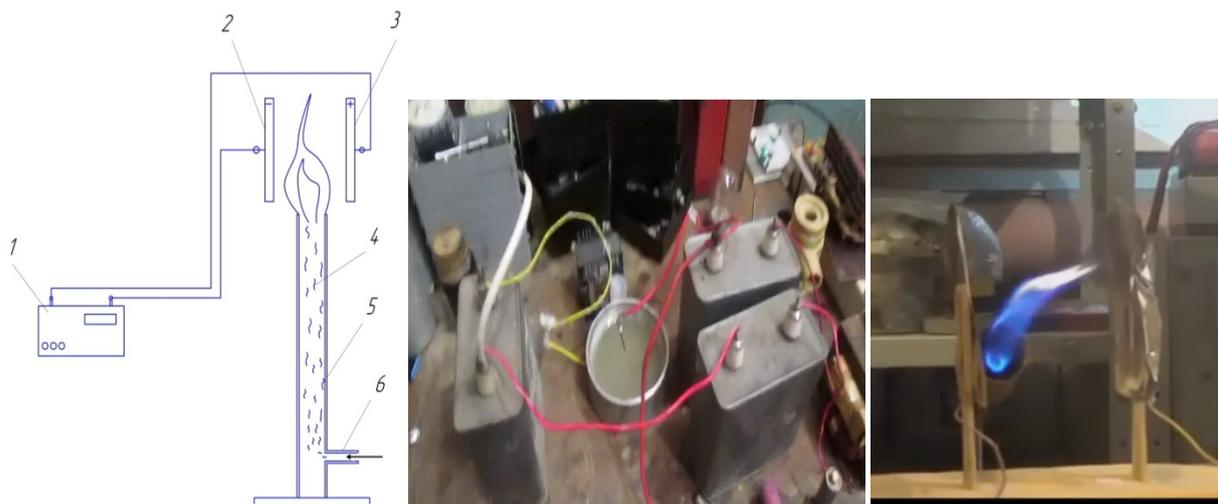
Интервал генерируемого напряжения, кВ	0–45	
Мощность генератора, Вт	50	
Частота, кГц	19 (для переменного тока)	
Ток, мА	2,2; постоянный/переменный	
Особенности:		
	– плавная регулировка напряжения (с шагом в 100 В)	
	– индикация текущего напряжения	

Таблица 2 – Параметры модели газопровода

Диаметр трубки, мм	10, 15, 25	
Давление газа, МПа	0,001; 0,002; 0,003	Скорость газа, м/с 0,42; 0,92; 1,76
Высота пламени, м	0,1; 0,3; 0,45	
Площадь электродов, см <sup>2</sup>	25, 30, 50	

Таблица 3 – Абсолютная погрешность генератора

Среднее значение	Дисперсия, D(n)	Среднеквадратическое отклонение, $\sigma(n)$	Абсолютная погрешность, кВ
15	45,56	6,74	0,045
22,71	78,97	8,88	



1 – генератор высокого напряжения, 2 – отрицательный электрод (катод), 3 – положительный электрод (анод), 4 – газовая смесь, 5 – металлическая трубка, 6 – соединение с газовым баллоном

Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для исследования электрического способа тушения

При расчетах погрешностей измерений использовался доверительный интервал с вероятностью 95%.

Основываясь на формулах, определяющих энергию электрического поля и энергию газовой струи можно вывести общую формулу для сравнения энергий газовой струи и электрического поля, и формулу для определения требуемой напряженности электрического поля для различных диаметров газопровода.

Для того, чтобы электрическое поле оказывало влияние на газовую струю, должно соблюдаться условие (1),

$$E_{\text{газ}} < E_{\text{эл}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{газ}}$  – энергия потока газовой струи, Дж,  
 $E_{\text{эл}}$  – энергия электрического поля, Дж.

Подставляя в условие (1) известные значения, получаем следующее (2),

$$\frac{\overline{v^2} V_{\text{см}} \gamma_{\text{см}}}{2g} < 0.5 \overline{E_{\text{н}}} \varepsilon \varepsilon_0 S U, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость выхода газа, м/с,  
 $V_{\text{см}}$  – объем смеси, м<sup>3</sup>,  
 $\gamma_{\text{см}}$  – удельный вес смеси, Н/м<sup>3</sup>,  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,  
 $E_{\text{н}}$  – напряженность электрического поля, В/м,  
 $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость воздуха, Ф/м,  
 $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м,  
 $S$  – площадь электродов, м<sup>2</sup>,  
 $U$  – напряжение на электродах, В.

Используя полученную формулу (2) можно определить напряженность  $E_{\text{н}}$ , при которой электрическое поле будет оказывать влияние на энергию газовой струи.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований по определению эффективности способа тушения пламени электрическим полем. Рассмотрена проблема возникновения диэлектрического пробоя. Определена необходимая напряженность электрического поля, для воздействия на газовый поток.

В ходе исследований были проведены эксперименты по определению зависимости величины напряжения гашения от:

- межэлектродного расстояния при тушении пламени на модели газопровода с изменяющимися параметрами давления от 0,001 до 0,003 МПа;
- межэлектродного расстояния при тушении пламени на модели газопровода с изменяющимися диаметрами от 10 до 25 мм;
- межэлектродного расстояния при тушении пламени на модели газопровода с изменяющейся площадью электродов от 25 до 50 см<sup>2</sup>.

Параметры проведения экспериментов представлены во второй главе, в Таблице 2.

Результаты экспериментов по определению зависимости напряжения гашения от межэлектродного расстояния при тушении пламени на модели газопровода под давлением 0,001, 0,002 и 0,003 МПа, с различными межэлектродными расстояниями (от 10 до 25 см) показали, что с

увеличением межэлектродного расстояния на 1 см, требуемое напряжение гашения возрастает на 1,37 кВ, что указывает на равномерное увеличение требуемого напряжения гашения от межэлектродного расстояния.

Разница между напряжениями гашения при различных давлениях газа в максимальных и минимальных значениях составляет от 2,9 до 4,1%, что находится в пределах относительной погрешности измерений.

На основании экспериментальных данных, с помощью применения метода «Монте-Карло» получены необходимые экспериментальные значения для проведения трехпараметрической регрессии, в результате которой определен вид зависимости (Рисунок 2).

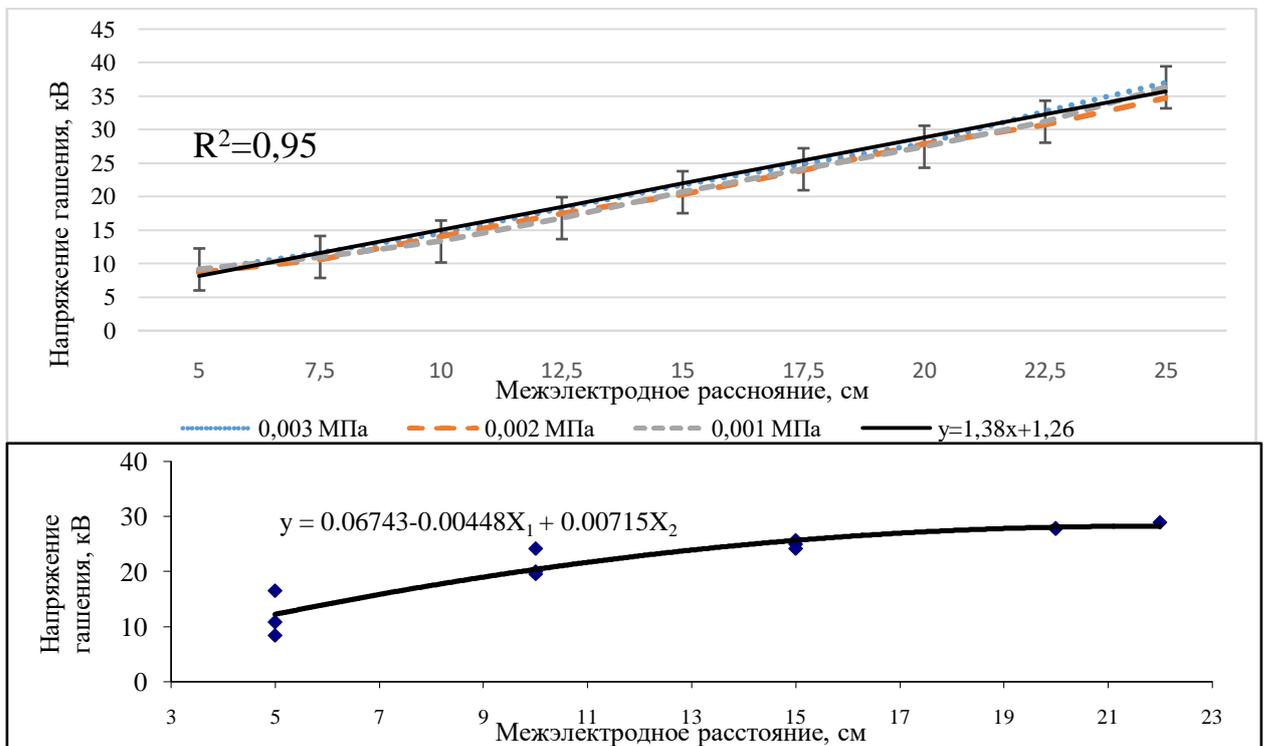


Рисунок 2 – Зависимость напряжения гашения от межэлектродного расстояния при давлениях в газовой трубке 0,001; 0,002; 0,003 МПа

В качестве параметра регрессии ( $X_2$ ) принималась величина межэлектродного расстояния, а в качестве ( $X_1$ ) – давление газовой смеси.

В компьютерной программе Elcut 6.3 проведено моделирование электрического поля, образующегося при расстоянии 15 и 25 см между электродами при напряжениях гашения 21,78 кВ и 36,98 кВ соответственно (Рисунок 3).

Данная модель отображает линии и области напряженности электрического поля между двумя электродами с начальными условиями, при которых проводились исследования. Также представлена цветовая шкала напряженности электрического поля. Области с максимальной напряженностью изображены красным цветом. Области с минимальной – синим цветом. Области с наибольшей напряженностью располагаются на поверхности электродов. Максимальная напряженность составляет  $\sim 1,38$  кВ/см при межэлектродном расстоянии в 15 см и  $\sim 1,48$  кВ/см – при 25 см, что соответствует экспериментальным данным.

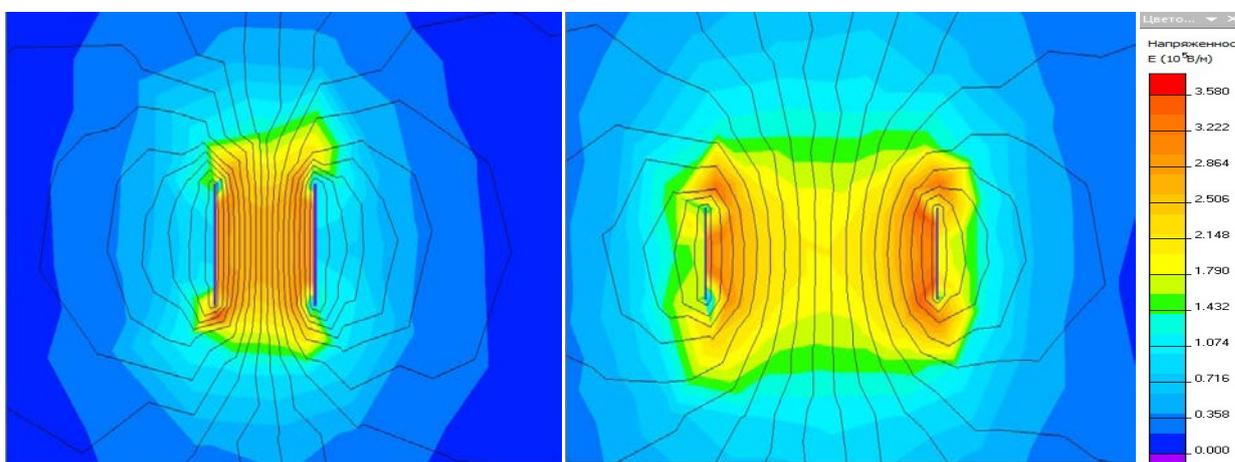


Рисунок 3 – Электрическое поле между электродами при давлении 0,003 МПа, при межэлектродном расстоянии 5 см (слева), 25 см (справа)

Результаты исследований по определению зависимости напряжения гашения от межэлектродного расстояния при тушении пламени на модели газопровода с диаметрами 10, 15 и 25 мм, показали, что с увеличением межэлектродного расстояния на 1 см, требуемое напряжение гашения возрастает на 1,71 кВ, что указывает на равномерное увеличение требуемого напряжения гашения от межэлектродного расстояния и их прямую зависимость.

Разница между напряжениями гашения при различных диаметрах отверстий в газопроводе в максимальных и минимальных значениях составляет от 3,1 до 4,7 %, что находится в пределах относительной погрешности измерений.

В сравнении с предыдущими опытами напряжение гашения увеличилось на 15,76 %.

На основании экспериментальных данных, с помощью применения метода «Монте-Карло» получены необходимые экспериментальные значения для проведения трехпараметрической регрессии, в результате которой определен вид зависимости (Рисунок 4).

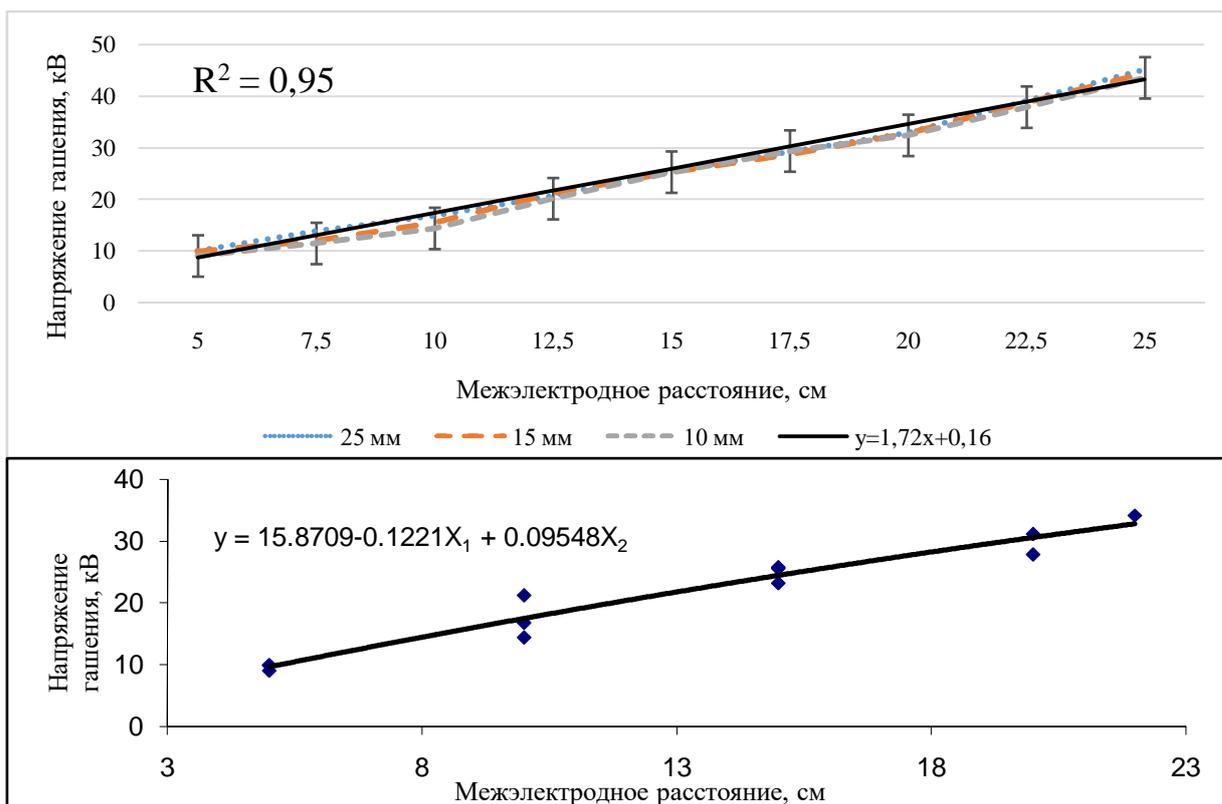


Рисунок 4 – Зависимость напряжения гашения от межэлектродного расстояния при диаметрах газовой трубки 10, 15, 25 мм

Проведено моделирование электрического поля, образующегося при расстояниях 15 и 25 см между электродами при напряжениях гашения 25,55 кВ и 45,18 кВ соответственно (Рисунок 5).

Максимальная напряженность составляет  $\sim 1,7$  кВ/см при межэлектродном расстоянии в 15 см и  $\sim 1,8$  кВ/см – при 25 см, что соответствует экспериментальным данным.

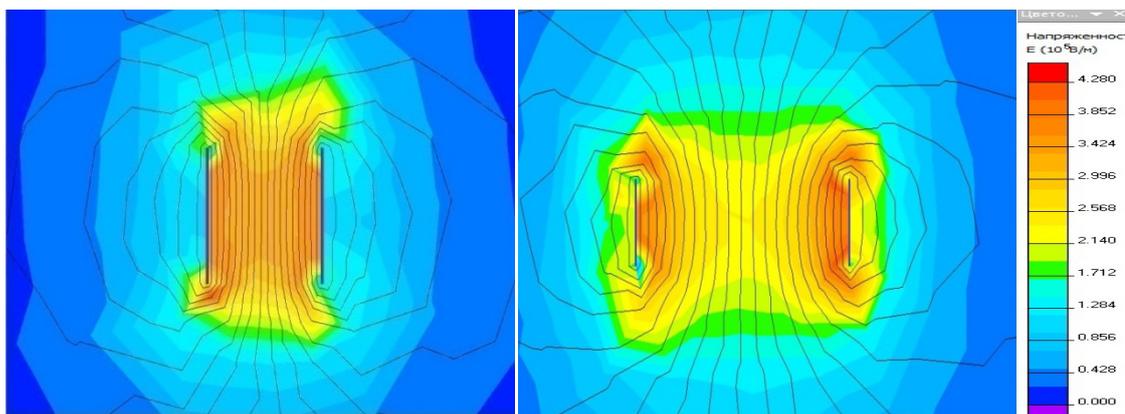


Рисунок 5 – Электрическое поле между электродами при диаметре газовой трубки 25 мм, при межэлектродном расстоянии 5 см (слева), 25 см (справа)

Исходя из значений увеличения напряжения гашения с расширением межэлектродного пространства на 1 см, можно сделать вывод, что в экспериментах с увеличением диаметра отверстия газопровода, требуемое напряжение гашения будет возрастать в 1,25 раз больше, чем в экспериментах при увеличении давления газа.

Установлено, что при каждом увеличении межэлектродного расстояния на 1 см увеличивается и требуемое напряжение гашения на величину из диапазона 1,37–1,71 кВ. При межэлектродном расстоянии от 26 см и более гашение пламени не происходит, если напряжение гашения увеличивается менее чем на 1,37 кВ. При межэлектродных расстояниях от 4 см и менее происходит электрический пробой, если напряжение гашения увеличивается более чем на 1,71 кВ.

При проведении экспериментальных исследований также найдены зависимости высоты пламени от площади трубки (Рисунок 6).

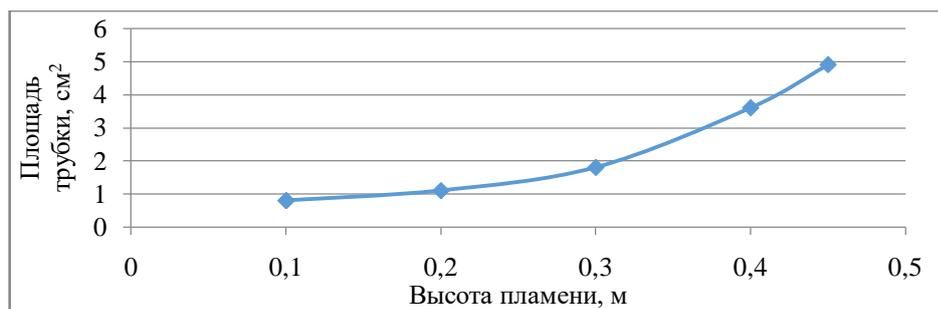


Рисунок 6 – Зависимость высоты пламени газовой смеси от площади отверстия трубки

Проведено исследование по определению зависимости напряжения гашения от давления газовой смеси на модели газопровода (от 0,001 до 0,005 МПа) при межэлектродном расстоянии 10 см и диаметре отверстия 16 мм.

Модель газопровода состоит из металлической трубы, диаметром 40 мм. На одном из выходов трубы установлена заглушка, к другому выходу через редуктор подключается газовый баллон. В трубе есть отверстие диаметром 16 мм, имитирующее прорыв в газопроводе.

Ход проведения исследования:

В металлическую трубу подается газовая смесь из баллона. Давление подачи смеси регулируется с помощью редуктора. По мере заполнения объема трубы, газовая смесь поступает в окружающую среду через отверстие диаметром 16 мм. Далее газовая смесь поджигается на выходе. После этого на горящую смесь наводится электрическое поле следующим образом: металлическая труба подключается к отрицательному полюсу высоковольтного генератора, а в качестве положительного полюса используется полый цилиндрический электрод высотой 10 см диаметром 8 см, который накладывается на пламя так, чтобы пламя находилось внутри него. Напряжение на генераторе постепенно увеличивается до момента гашения пламени, а затем, фиксируется.

Для отбора значений, необходимых для обработки результатов методом регрессии применен метод «Монте-Карло» (Рисунок 7).

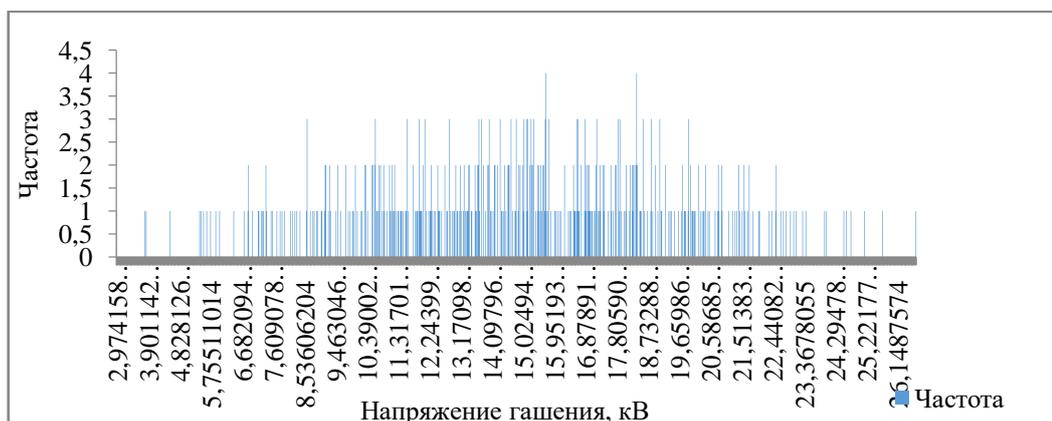


Рисунок 7 – Отбор данных методом «Монте-Карло»

С помощью метода «Монте-Карло» получены необходимые значения для проведения регрессии, в результате которой определен вид зависимости (Рисунок 8), где  $y$  – напряжение гашения,  $X_1$  – давление газовой смеси.

На основе экспериментальных данных смоделированы напряженность и напряжение электрического поля, воздействующего на пламя (Рисунок 9).

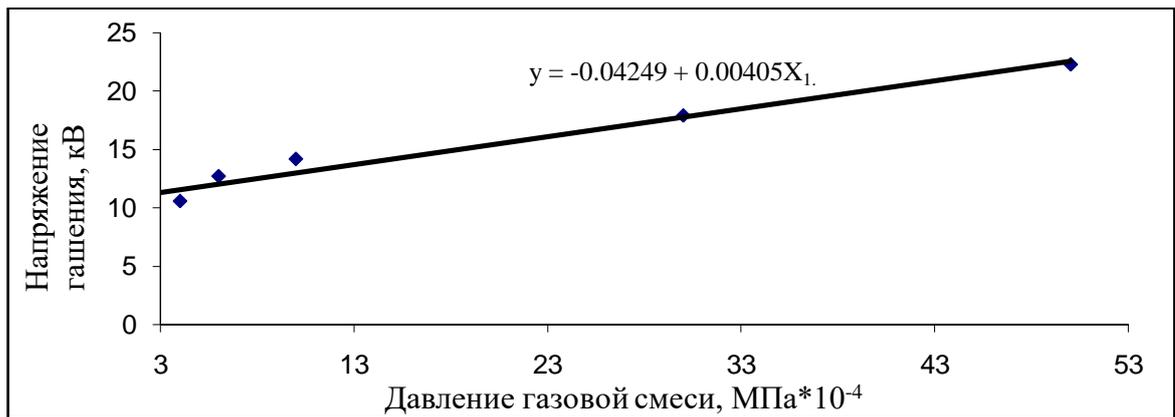


Рисунок 8 – Зависимость напряжения гашения от давления газовой смеси

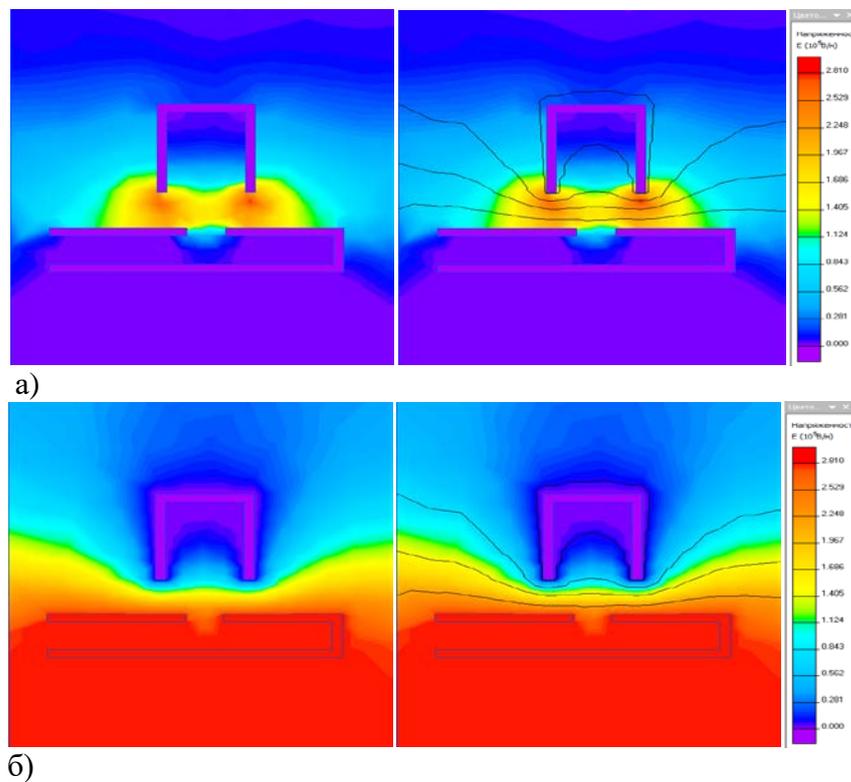


Рисунок 9 – Моделирование напряженности (а) и напряжения (б) электрического поля

При проведении вышеперечисленных экспериментальных исследований возникало явление электрического пробоя, при котором гашение пламени становилось невозможным. Эффект электрического пробоя обусловлен возникновением электрической дуги, при котором, вся напряженность поля, распределенная по всему объему межэлектродного пространства, сосредотачивается в одну область – электрический разряд.

Электрический пробой возникал при напряженности электрического поля свыше 2 кВ/см (напряжение в 2 кВ между электродами на расстоянии 1 см друг от друга). На возникновение электрического пробоя влияют влажность окружающего воздуха, давление, расстояние между электродами, напряжение на электродах и электрическая прочность материала (воздух).

Таким образом, можно сделать вывод о зависимости диэлектрического пробоя воздуха от межэлектродного расстояния и напряжения гашения.

По графику (Рисунок 10), электрический пробой происходит в точке А, при напряжении в 20000 В на расстоянии между электродами 10 см. При таких значениях невозможно увеличивать напряжение свыше 20000 В на расстоянии до 10 см. Для того, чтобы снизить вероятность электрического пробоя, необходимо повысить электрическую прочность материала.

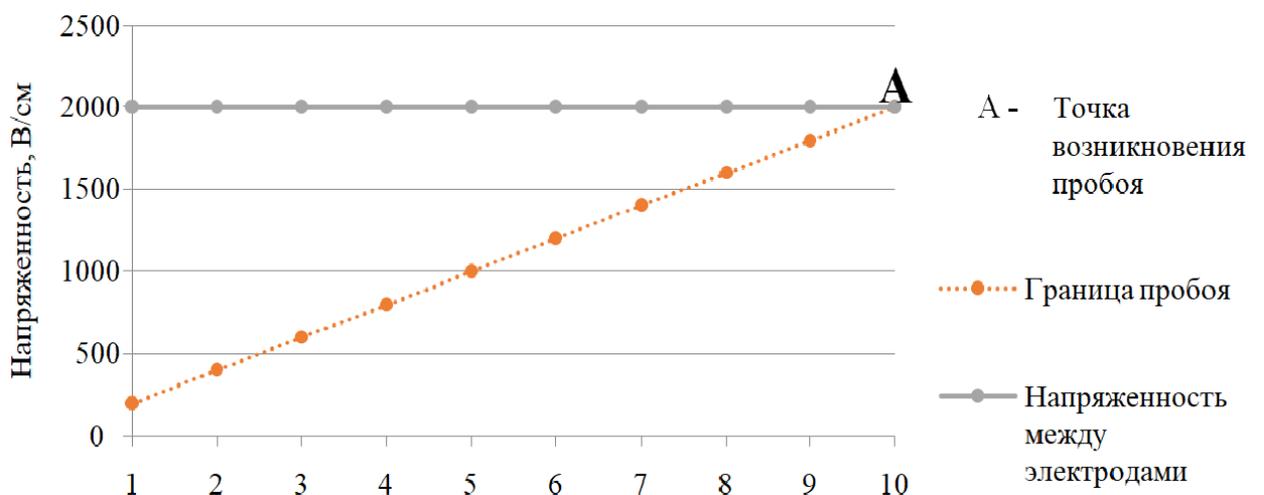


Рисунок 10 – График зависимости напряженности электрического поля от расстояния между электродами

Решением является нанесение диэлектрического покрытия (электротехнический фарфор) на электроды, что позволяет увеличить максимальную границу напряжения пробоя в 100 раз (до 2000 кВ).

По формуле (2) проведен расчет для определения необходимой напряженности электрического поля при воздействии на газовую струю. Из графика (Рисунок 11) видно, что с увеличением площади электродов снижается требуемая напряженность электрического поля и повышается эффективность его воздействия на пламя.

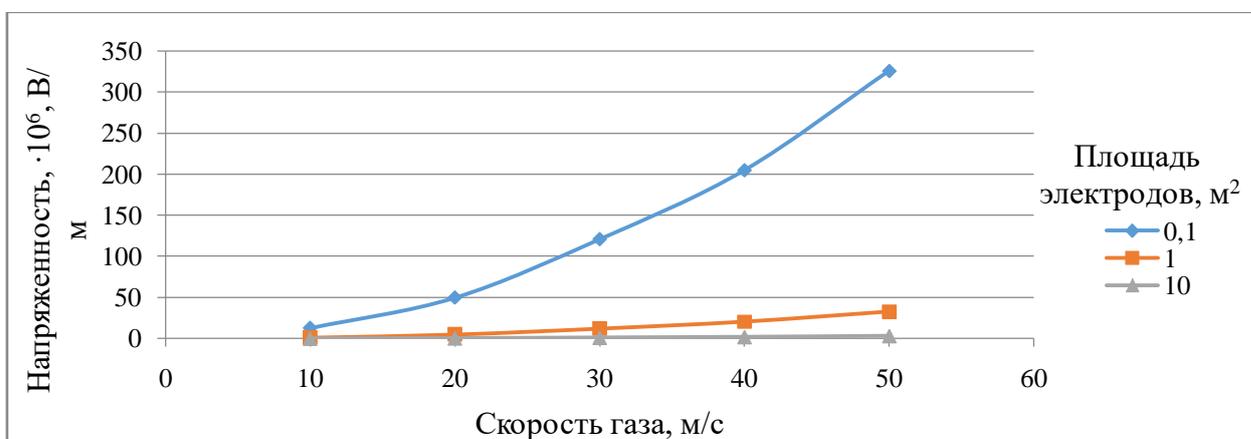


Рисунок 11 – Значения требуемых напряженностей электрического поля при различных скоростях газа

**В четвертой главе** представлены результаты по расчетам времени остывания стенок газопровода до температуры самовоспламенения природного газа при различных способах охлаждения, а также представлена разработка комплексного способа тушения пожара газопроводов с помощью электрического поля путем исследования и методов, заключающихся в масштабировании результатов экспериментальных исследований по тушению пожара модели газопровода.

После гашения пламени газопровода электрическим полем существует опасность повторного возгорания, вследствие нагрева стенок газопровода до высоких температур, превышающих температуры самовоспламенения компонентов газа. Для исключения этой опасности проведен расчет времени остывания стенок до температур, недостаточных для самовоспламенения

газа, а также моделирование нестационарных тепловых потоков. Результаты расчета позволяют определить минимальное время воздействия электрического поля для исключения повторного самовозгорания.

Результаты данного моделирования представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Зависимость температуры стенки газопровода от времени ее остывания до температуры газов, входящих в газовую смесь

Компонент природного газа	Температура окружающей среды, К		
	293	273	233
	Время, необходимое для остывания стенки газопровода до температуры ниже точки самовоспламенения вещества, мин		
Пентан	58	56	49
Бутан	47	46	40
Изобутан	46	44	38
Метан	35	34	28
Пропан	44	42	35
Природный газ	38	37	31

В качестве охлаждающей среды для газопровода рассматривались: воздух при температуре 20 °С (293 К), воздух при температуре 0 °С (273 К) и охлаждающая аммиачная установка с температурой охлаждения -40 °С (233 К). В Таблице 4 представлены зависимости температуры стенки газопровода от времени ее остывания до температуры самовоспламенения газов, входящих в газовую смесь. Минимальное время охлаждения очага возгорания, для исключения повторного возгорания газовой смеси из-за высоких температур, составляет 31 минуту при охлаждении с помощью аммиачной установки.

На Рисунке 12 представлен график зависимости температуры стенки газопровода от времени охлаждения до температуры самовоспламенения природного газа.

Из графика видно, что максимальная скорость охлаждения обеспечивается аммиачной установкой, примерно 66,6 К/мин, остальные способы – 55 и 53,6 К/мин соответственно.

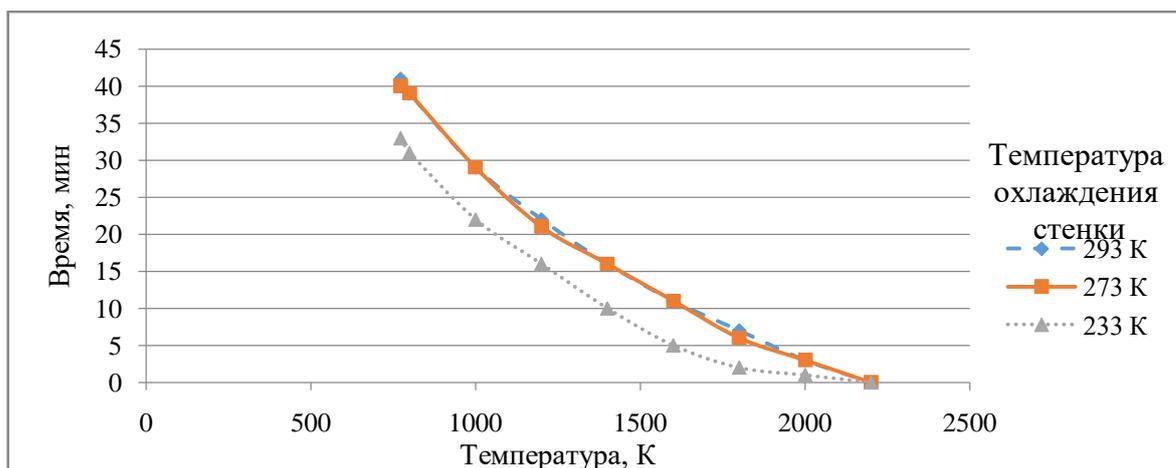


Рисунок 12 – Зависимость от времени охлаждения температуры стенки газопровода до температуры самовоспламенения природного газа

Таким образом, время минимального охлаждения для предотвращения повторного возгорания составит 31 минуту (при охлаждении аммиачной установкой), 37 минут (при охлаждении воздухом температурой 0 °С) и 38 минут (при охлаждении воздухом температурой 20 °С).

Предлагаемые научно-методологические основы комплексного тушения пожаров газопроводов с использованием электрического поля включают следующие основные этапы:

- непосредственное тушение пламени электрическим полем;
- охлаждение стенки газопровода;
- перекрывания газопровода.

Для масштабирования результатов опытов выбраны трубы трех видов диаметрами: 89, 102, 114 мм, и толщиной стенок: 11,5; 15,5; 16 мм соответственно. Масштабирование проводилось на основании изменения параметров: напряжение гашения, площадь электродов, ток и мощность генератора.

В Таблице 5 приведены результаты масштабирования опытов для трех типов труб газопроводов. Сформулированы предложения технической реализации тушения пожаров на газопроводах электрическим способом. Рассмотрен способ создания требуемого напряжения для генерации электрического поля.

Таблица 5 – Результаты масштабирования опытов

Технические характеристики установки пожаротушения	Диаметры газопроводов, мм		
	89	102	114
Площадь электродов, см <sup>2</sup>	642,4	642,4	642,4
Напряжение, кВ	218	218	218
Ток, мА	20,64	20,64	20,64
Мощность, Вт	4500	4500	4500

Так, для газопровода диаметром 114 мм потребуется установка со следующими параметрами:

- площадь электродов: 642,4 см<sup>2</sup>;
- мощность: 4,5 кВт;
- необходимое напряжение: до 218 кВ.

Применяя схему высоковольтного генератора, можно получить на его выводах напряжение до 30 кВ, далее, подключая к его выходам импульсный генератор с набором конденсаторов определенных емкостей, можно увеличить выходное напряжение в 3–10 раз, то есть, до 105–300 кВ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Рассмотрена теоретическая модель воздействия электрического поля на пламя, с помощью которой осуществляется взаимодействие заряженных частиц электрического поля с пламенем.

2 Разработана лабораторная установка пожаротушения на основе генератора высоковольтного напряжения. Установка генерирует напряжение до 45 кВ. Позволяет гасить открытое пламя на модели газопровода с помощью электрического поля высокой напряженности.

3 С помощью лабораторной установки пожаротушения исследованы влияния электрического поля на пламя горения газа, при изменяемых параметрах (диаметр отверстия от 10 до 25 мм, давление газовой смеси 0,001 – 0,003 МПа, площадь электродов от 25 до 50 см<sup>2</sup>),

получены зависимости напряжения гашения от межэлектродного расстояния, что позволяет обосновать возможность применения электрического поля как способа тушения пожаров газопроводов низкого давления.

4 Установлено, что при увеличении межэлектродного расстояния на 1 см, наблюдается повышение требуемого напряжения гашения в диапазоне от 1,37 до 1,71 кВ.

5 Разработан способ ликвидации открытого горения газопроводов с применением электрического поля, включающие 3 основных этапа: тушение пламени электрическим полем, охлаждение и перекрытие газопровода. Рассчитана скорость охлаждения стенки газопровода при различных способах охлаждения. Наиболее высокая скорость наблюдается при охлаждении аммиачной установкой – 66,6 К/мин. При охлаждении водой – 55 К/мин. Без охлаждения – 53,6 К/мин.

**Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:**

**В рецензируемых журналах из списка ВАК**

1. Хафизов, Ф. Ш. Исследование влияния электромагнитного поля высокой напряженности на пламя / Ф. Ш. Хафизов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 2. – С. 105-110.

2. Хафизов, Ф. Ш. Ионный ветер как возможный способ тушения пожаров / Ф. Ш. Хафизов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 2. – С. 111-116.

3. Пермяков, А. В. Электрический пробой диэлектрика и его влияние на тушение пламени электромагнитным способом / А. В. Пермяков [и др.] // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2018. – № 2. – С. 117-128. – URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2\\_2018/ogbus\\_2\\_2018\\_p117-128\\_PermyakovAV\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2018/ogbus_2_2018_p117-128_PermyakovAV_ru.pdf).

4. Васильева, Т. В. Применение технологии бесконтактного электротушения пожара на объектах нефтегазовой промышленности / Т. В. Васильева [и др.] // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019. – № 4. – С. 32-41. – URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/4\\_2019/ogbus\\_4\\_2019\\_p32-41.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/4_2019/ogbus_4_2019_p32-41.pdf).

**В других изданиях**

5. Низаев, И. И. Воздействие ионного ветра на пламя / И. И. Низаев, А. В. Пермяков // Актуальные проблемы науки и техники-2017 : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 96.

6. Насыров, Р. И. Влияние на пламя электромагнитного поля высокой напряженности / Р. И. Насыров, А. В. Пермяков // Актуальные проблемы науки и техники-2017 : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 97.

7. Пермяков, А. В. Влияние электрического поля на пламенное горение ароматических углеводородов / А. В. Пермяков // Вестник науки и образования. – 2019. – № 18(72). – С. 35-37.

8. Пермяков, А. В. Модернизация инфракрасного извещателя пожарной сигнализации для резервуарного парка ПВД-2 / А. В. Пермяков, А. В. Краснов, В. М.

Сапельников // 64-я научно-техническая конференция УГНТУ : матер. науч.-техн. конф. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2013. – С. 245.

9. Пермяков, А. В. Тушение пламени ароматических углеводородов с помощью электромагнитного поля / А. В. Пермяков, И. И. Исламов, Ф. Ш. Хафизов, И. Ф. Хафизов // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Изд-во УГНТУ. 2018. – С. 361-362.

10. Пермяков, А. В. Моделирование температурных полей нефтяных и газовых скважин при пожарах / А. В. Пермяков, М. А. Филиппов. // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Изд-во УГНТУ. 2018. – С. 374