

На правах рукописи



Крехов Алексей Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВЗРЫВА
ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА**

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Минкин Андрей Николаевич

Официальные оппоненты:
Ганигин Сергей Юрьевич
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Радиотехнические устройства», заведующий кафедрой

Батуро Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», научно-технический центр, заместитель начальника Академии по научной работе – начальник научно-технического центра

Ведущая организация:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 10 февраля 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.05, созданного на базе «Сибирского федерального университета» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте «Сибирского федерального университета» www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Освоение северных территорий в первую очередь связано с разработкой нефтегазовых месторождений и требует изучения разноплановых оценок степени риска работы при низких температурах и в суровых климатических условиях. При этом анализ чрезвычайных ситуаций является одним из главных аспектов при понимании обеспечения безопасности таких объектов, в том числе при количественной оценке риска.

Данные по аварийности на объектах трубопроводного транспорта собираются на государственном уровне во всех ведущих странах, например: Россия (Ростехнадзор с 2004 г.), США (OPS PHMSA с 1971 г.), Канада (NEB с 1959 г.). В Европе статистику ведут добровольные объединения EGIG, UKOPA, CONCAWE. Однако, при анализе мирового опыта в этой области становится понятно, что в связи с разрозненностью статистики, сопутствующими условиями, индивидуальными особенностями каждой страны и принципиально разному подходу к понятию «авария», прямое сравнение этих данных является объемной задачей и может привести к различной интерпретации результатов. Поэтому усредненным критерием и основной статистической характеристикой аварийности на магистральных трубопроводах можно назвать интенсивность аварий, выражаемую отношением количества аварий в единицу времени (обычно в год) к единице длины трассы (на 1000 км). Принимая за основу этот критерий и проведя анализ известных из открытых источников аварийных ситуаций, можно выделить различные причины их возникновения, которые можно объединить в несколько обобщенных групп: коррозия, дефекты оборудования/материалов, внешние воздействия, природные воздействия, ошибочные действия персонала.

Первые два фактора подробно изучены в источниках, как и действия персонала такие как грубые нарушения требований промышленной безопасности руководством и персоналом компаний в процессе эксплуатации, технического обслуживания и ремонта трубопроводов и оборудования. Во внешних воздействиях причиной принимается деятельность третьих лиц. При изучении влияния природных воздействий акцент ставится в основном на подвижки грунта, но при этом температурные воздействия, в том числе влияние низких температур остается малоизученным.

Проведенный анализ известных аварийных ситуаций на территории Российской Федерации за последние 30 лет показывает, что если прорыв газопровода возник при низких температурах окружающего воздуха, то пожар возникает в 66% случаях. Это связано с тем, что при крайне низких температурах окружающей среды, в атмосферу испаряются низкомолекулярные органические соединения природного газа (далее – ПГ), в том числе эфиры, распространение пламени по которым происходит с большей скоростью, чем по испарениям ПГ при положительных температурах. В то же время процесс

ликвидации аварийной ситуации (пожаротушение) в арктических условиях является затруднительным в связи со спецификой процесса тушения.

Также установлено, что приборов измерения аварийных ситуаций для климата северных территорий практически нет так же, как и доступных не лабораторных методов. Поэтому разработка новых методов и приборов измерения становится актуальной научной задачей. Решение данной задачи позволит повысить техногенную безопасность при освоении нефтегазовых месторождений северных территорий Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования

Теоретические основы горения и взрыва ГВС, заложенные классическими трудами Н.Н. Семенова, Б.Я. Зельдовича, получили свое дальнейшее развитие в исследованиях А.И. Розловского, Г.Д. Саламандры, Р.И. Солоухина, А.С. Соколика. В работах таких авторов, как В.Я. Балтайтис, А.А. Гурин, Н.Р. Шевцов, С.Ю. Ганигин, А.В. Рудаченко, П.М. Петрухин, М.И. Нецепляев, В.Н. Качан, В.С. Сергеев, И.Ф. Ярембаш, А.М. Чеховских, В.М. Плотников, В.И. Гудков, А.Г. Абинов, С.Н. Осипов, Ю.Ф. Булгаков, представлены основные исследования взрывов ГВС и разработки способов и средств борьбы с ними. Проведя обзор и проанализировав существующие на данный момент исследования, установлено, что принципы, которые действуют в пожарной безопасности для опасных объектов нефтегазового комплекса в условиях Севера, в полной мере не разработаны. Для этого необходимо провести дополнительные исследования и детально учесть, каким образом низкие температуры влияют на параметры возникновения пожара и взрыва.

Цель исследования: повышение техногенной безопасности при освоении нефтегазовых месторождений северной территории Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Обосновать возможность контроля взрыва газовой смеси по изучению величины теплового потока.

2. Разработать метод и прибор контроля взрыва газовой смеси по параметрам теплового потока.

3. Экспериментально подтвердить возможность измерения параметров взрыва по параметрам теплового потока, посредством применения разработанных метода и прибора, в условиях различных температур окружающей среды.

4. Разработать практические рекомендации по применению предложенных метода и прибора для повышения техногенной безопасности при освоении нефтегазовых месторождений северной территории Российской Федерации.

Объект исследования. Газовоздушные смеси.

Предмет исследования. Термодинамические параметры взрыва.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались эмпирические методы исследования (моделирование,

измерение, наблюдение и эксперименты). В результате применения эмпирических методов исследования была определена цель, сформулированы задачи исследования и выдвинута соответствующая гипотеза. Проведена обработка полученных в ходе эксперимента результатов протекания взрыва по параметру теплового потока при различных температурах окружающей среды. Проведены процедуры перевода полученных данных («сырых данных») в закономерности.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый метод контроля измерения параметров взрыва газовой смеси отличающийся от известных фиксацией изменения теплового потока, позволяющий упростить процесс регистрации аварийных ситуаций.

2. Разработан прибор измерения величины теплового потока отличающийся высокой скоростью измерения по сравнению с аналогами и расширением диапазона применения в область низких температур.

3. Исследовано влияние отрицательной температуры окружающей среды (ниже - 30°C) на величину теплового потока при взрыве газовой смеси. Установлена область критической температуры кардинально меняющая характер динамики взрыва газовой смеси.

4. Впервые установлен экспериментально и обоснован математическим моделированием характер влияния низких температур на мощность протекания взрыва при утечке природного газа, что позволяет вынести новые рекомендации по обеспечению пожарной безопасности на месторождениях крайнего Севера.

На защиту выносятся результаты теоретических и расчетных исследований, а также разработанные на их основе рекомендации по контролю теплового потока при взрыве ГВС в условиях различных температур окружающей среды:

1. Метод контроля теплового потока при взрыве газовой смеси.

2. Прибор контроля теплового потока при взрыве газовой смеси.

3. Результаты экспериментальных исследований параметров взрыва газовой смеси при различных температурах окружающей среды.

4. Зависимость влияния низких температур на параметры теплового потока.

Практическая значимость работы. На основе теоретических и экспериментальных исследований в работе предложен метод контроля теплового потока при взрыве ГВС на объектах производства, хранения и транспортировки ПГ. Основные результаты работы могут быть использованы при обеспечении безопасного функционирования этих объектов в условиях низких температур. Техно-экономическая эффективность прибора фиксации взрыва ГВС связана со снижением потерь от возникающих пожаров и взрывов за счет точного и быстрого определения очага и стадии их развития.

Реализация результатов работы. Результаты исследования внедрены в деятельность Главного управления МЧС России по Красноярскому краю, АО «Красноярсккрайгаз» и использованы в учебном процессе кафедры «Пожарная безопасность» Института нефти и газа Сибирского федерального университета, что подтверждено соответствующими актами.

Достоверность результатов исследования доказана теоретически и экспериментально, аргументирована научными положениями. Результаты работы и выводы подтверждены статистическими методами обработки результатов наблюдений. Для исследования разработан экспериментальный стенд и прибор контроля теплового потока, позволяющие регистрировать взрыв и горение в условиях различных температур окружающей среды.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы представлены на I Всероссийской молодежной научно-технической конференции нефтегазовой отрасли «Молодая нефть» (Красноярск, 17–19 мая 2014 года); IV Всероссийской молодежной научно-технической конференции нефтегазовой отрасли «Молодая нефть» (Красноярск, 20 мая 2017 года); II Международной молодежной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 24-25 сентября 2015 года); VIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций» (Железногорск, 26 октября 2018 года); 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT 2020) «International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies» (Санкт-Петербург, 04 марта 2020 года); III Международной научной конференции «APITECH-III - 2021: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (Красноярск, 24 сентября – 3 октября 2021 года); заседаниях кафедры пожарной безопасности Института нефти и газа Сибирского федерального университета и кафедры топливообеспечения и горюче-смазочных материалов Сибирского федерального университета.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач исследования, разработке метода контроля теплового потока при взрыве ГВС и прибора измерения параметров взрыва ГВС в условиях отрицательных температур окружающей среды, непосредственном проведении экспериментов, обобщении полученных результатов, подготовке научных статей и практических рекомендаций по совершенствованию системы обеспечения пожарной безопасности и повышению эффективности функционирования объектов производства, хранения и транспортировки ПГ в специфических условиях Крайнего Севера.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в т. ч. 4 работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 2 в базе данных SCOPUS, получен патент на полезную модель RU 195452 U1, 28.01.2020.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 158 страниц машинописного текста, 21 таблицу, 72 рисунка, 66 формул. Список литературы включает 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, поставлены цель и задачи исследований, сформулированы основные тезисы, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** приведен анализ известных аварий на объектах нефтегазового производства в СССР и России за последние 30 лет, по результатам которого выявлены основные причины возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации магистральных газопроводов. К ним относятся усталость металла; коррозия, деформация и дефекты трубы; отказ запорной арматуры; влияние низких температур.

Далее было проведено исследование существующих методов и приборов контроля теплового потока при взрыве ГВС и их сравнение по характеристикам сложности, условиям работам, стоимости и др.

В ходе анализа также установлено, что подавляющее большинство применяемых методов являются сложными для реализации в полевых условиях, то есть вне специально оборудованных для этого лабораторий. А датчики обнаружения пожара или взрыва выступают одним из основных компонентов системы противопожарной защиты объектов различного функционального назначения, в том числе объектов нефтегазового комплекса в силу пожароопасности технологического процесса транспортировки нефти и природного газа. Выбор оптимального по типу датчиков, правильная их установка и соблюдение условий эксплуатации позволяют повысить эффективность системы защиты. Для этого в работе рассмотрен принцип действия основных типов датчиков, используемых в современное время датчиков, осуществлено их сравнение и выявлены основные недостатки такие как низкая скорость срабатывания, высокая стоимость, ограниченный температурный диапазон эксплуатации, малый радиус действия и недостаточная дальность обнаружения источника теплового потока. Все это может привести к позднему обнаружению аварийной ситуации, и, как следствие, к приостановке производства, простоя технологического оборудования, остановке снабжения конечного потребителя, а также к материальному ущербу и человеческим жертвам.

Таким образом, для повышения технологической безопасности объектов нефтегазового производства необходимо повысить скорость быстроедействия приборной базы, а также значительно увеличить зону функционирования и

температурный диапазон работы, так как при отрицательных температурах окружающей среды 66% аварийных ситуаций заканчивается пожаром или взрывом, в то время как при плюсовых погодных условиях аварийное событие ограничивается только утечкой газа и разрушением магистрального оборудования.

С этой целью были разработаны метод и прибор контроля теплового потока при взрыве ГВС при отрицательных температурах, чему посвящена **вторая глава** данной работы.

На первом этапе выполнен анализ характеристик газов, необходимых для проведения исследований. В качестве используемого газа применялся природный газ, что позволило приблизиться к реальным условиям протекания процессов на магистральных газопроводах. Воспламеняемость в смеси с воздухом приняты по верхнему и нижнему концентрационному пределам.

Следующим этапом стала разработка метода контроля состояния ГВС. В отличие от существующих разработанный метод позволяет получать значения теплового потока при взрыве ГВС при различных температурах окружающей среды. А посредством измерительного оборудования стала возможна вариация начальных параметров температуры и концентрации ГВС. После выбора газа и разработки принципиальной схемы метода произведен подбор измерительного оборудования.

Для получения экспериментальных данных разработан испытательный стенд, отображенный на рисунке 1.

Экспериментальное измерение теплового потока происходит следующим образом: двадцатиметровый полиэтиленовый двухслойный рукав (выполненный в форме трубы) с запаянными торцами (1) (диаметр трубы принят равным 1 м. (без учета натяжение стенок), толщина стенки 1 мм). Атмосферный воздух при помощи компрессора (8) через газовые шланги (4) и газовый расходомер диафрагменный с температурной компенсацией (5) поступает в полиэтиленовый рукав (трубу) с одного из торцов до появления натяжения стенок. Параллельно с подачей атмосферного воздуха через второй шланг осуществляется подача природного газа (6) для образования однородности среды в рукавной линии. Известно, что для реализации процесса горения, температура поджигающего источника должна быть выше, чем температура воспламенения. На основании этого в рукавную линию помещается источник зажигания (2). Далее труба герметизируется.

Затем осуществляется подача тока через пусковые провода (3) от источника (10) на пиропатрон (2). Снятие показаний взрыва производится посредством датчиков контроля теплового потока (9) и скоростной видеокамеры (11). Полученные данные могут быть переданы в ПЗУ ЭВМ посредством интерфейса RS485 и специализированного программного обеспечения (12).

Для реализации возможностей стенда был разработан новый прибор (датчик) для измерения параметров теплового потока (9) из схемы выше, который показан на рисунке 2.

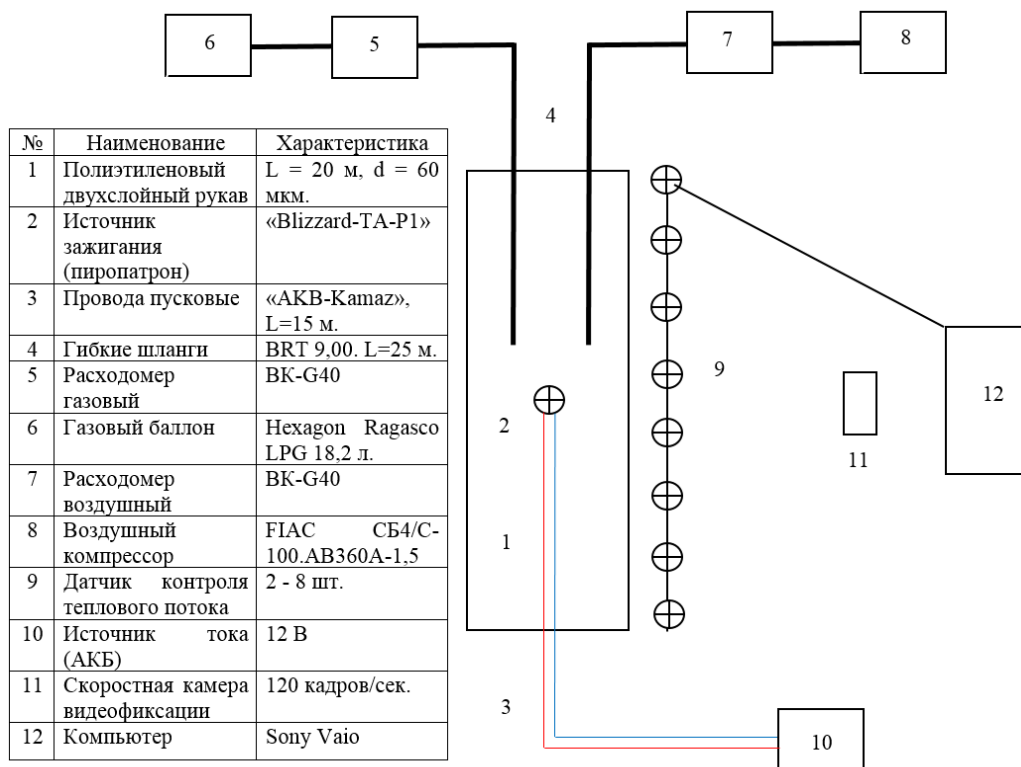


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда

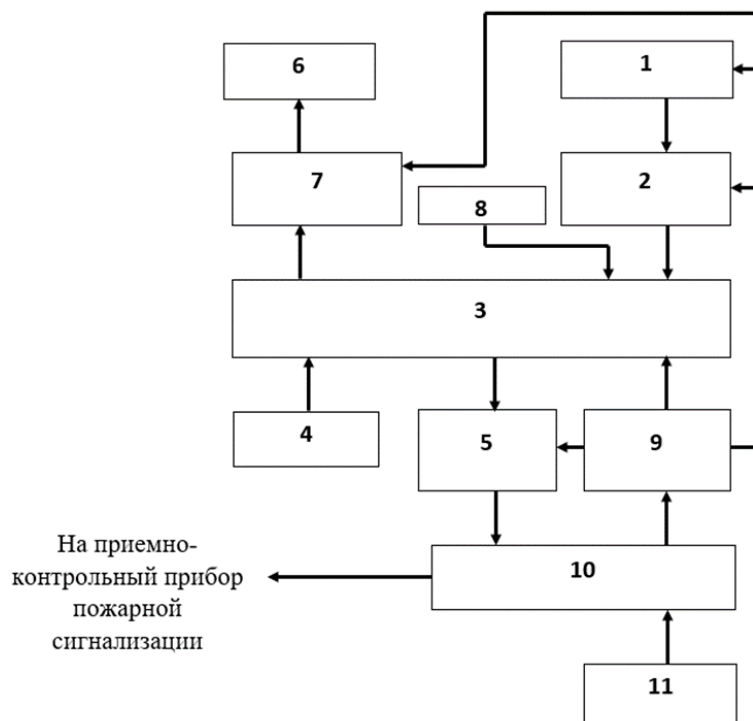


Рисунок 3 – Функциональная схема датчика контроля теплового потока:
 1 – фотогальванический полупроводниковый приемник излучения; 2, 7 – операционные усилители; 3 – процессор универсального назначения; 4 – кварцевый резонатора;
 5 – микросхема интерфейса RS-485; 6 – резистор подогрева; 8 – термодатчик;
 9 – стабилизатор напряжения; 10 – клеммная колодка; 11 – источник питания датчика

Предлагаемая полезная модель датчика контроля теплового потока используется следующим образом: фотогальванический полупроводниковый приемник излучения (1) фиксирует тепловой поток очага пожара или взрыва. Сигнал с приемника излучения усиливается посредством операционного усилителя (2). Усиленный сигнал направляется на аналоговый вход высокопроизводительного процессора универсального назначения ARM 32-bit Cortex™-M3 (3). Опорная частота процессора задается кварцевым резонатором (4) и составляет 8 МГц. Данное значение является достаточным, чтобы, согласно спецификации, снимать значения с аналогового входа процессора до 400 раз в секунду. Полученная с фотоприемника величина оцифровывается аналого-цифровым преобразователем, встроенным в процессор (что позволяет получить диапазон значений от -2048 до 2047) и посредством микросхемы интерфейса (5) передается на приемно-контрольный прибор пожарной сигнализации пакетом данных размером в 12 байт. Таким образом, при использовании высокопроизводительного процессора универсального назначения, максимально возможное количество обращений в секунду к приемно-контрольному прибору пожарной сигнализации при скорости 375 кбит/с и длине линии до 500 м составит (с учетом задержек) около 40 раз в секунду (при условии наличия одного устройства на линии), что обеспечивает возможность точного определения места очага пожара или взрыва, а также стадии их развития. Отправка пакета данных прибором сопровождается вспышкой светодиода, что позволяет визуально контролировать работу устройства. Подогрев внутреннего пространства предлагаемого устройства осуществляется резистором (6), дополнительно установленным в электрическую схему прибора и получающим питание от операционного усилителя (7) под управлением процессора (3).

Датчик представляет собой автоматическое оптико-электронное устройство, позволяющее регистрировать тепловой поток излучения углекислого газа в инфракрасном диапазоне. При этом световые помехи от источников естественного и искусственного освещения, проявляющиеся на более коротких волнах, оказывают слабое влияние на фотоприемник.

Прибором постоянно контролируется тепловой поток ИК-излучения, электронная схема производит обработку (фильтрацию и усиление сигнала), с последующим измерением его и выдачей в цифровом виде (интерфейс RS-485), на управляющий контрольно-адресный модуль по адресному запросу. Мигание светодиодного индикатора в смотровом окне сигнализирует о том, что идет опрос датчика управляющим контрольно-адресным модулем.

Конструкция датчика является единой и состоит из корпуса и одной двухсторонней печатной платы (рисунок 3), выполненной по SMD технологии, с габаритными размерами 45 x 95 мм. Масса п/платы не более 0,1 кг.

Прибор предназначен для круглосуточной, непрерывной работы в составе автоматических систем пожаротушения, систем контроля технологических процессов с управляющими контрольно-адресными модулями на основе промышленных микроконтроллеров. Датчик используется для непрерывного

мониторинга уровня ИК-излучения в контролируемой зоне и передачи его в цифровом виде по запросу от управляющего контрольно-адресного модуля. Датчик, помимо уличной эксплуатации, может эксплуатироваться в помещениях всех классов в условиях воздействия повышенной влажности и запыленности среды. Электрическое питание датчика осуществляется посредством двухпроводной электрической линии питания.

Извещатель изготавливается в исполнении с уровнем защиты оболочки IP67 по ГОСТ 14254-96 и позволяет обеспечивать непрерывное автоматическое тестирование работоспособности через заданный программой интервал времени в целях увеличения надежности обнаружения очага ИК-излучения и снижения эксплуатационных затрат, связанных с периодической проверкой работоспособности силами обслуживающего персонала.

Датчик контроля теплового потока соответствует требованиям технических условий ТУ 4371-003-83053726-2011.

Время срабатывания (обнаружения пламенной зоны) в соответствии с ГОСТ Р 53325-2009 не превышает 0,1 с и фактически составляет 0,025 с.

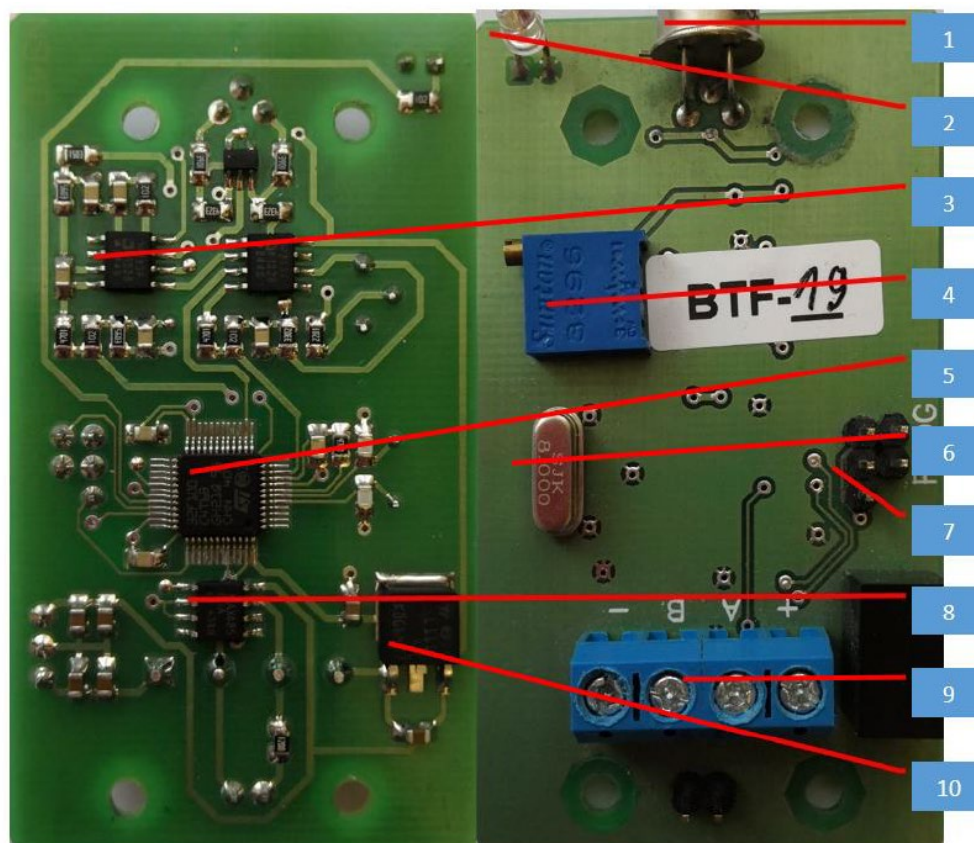


Рисунок 3 – Плата датчика вид с лицевой и тыльной сторон:

- 1 – чувствительный элемент датчика на базе ФЭ 723-2; 2 – светодиод;
- 3 – операционный усилитель на базе OP 213F; 4 – подстроечный резистор;
- 5 – процессор на базе ARM 32-bit Cortex™-M3; 6 – кварцевый резонатор;
- 7 – колодка для программирования адреса и режима работы; 8 – микросхема для работы с интерфейсом RS-485 на базе MAX485; 9 – колодка для подключения питания и линии интерфейса RS-485; 10 – стабилизатор питания

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований по контролю теплового потока при взрыве ГВС в условиях низких температур.

Результаты экспериментов, проведенных в летнее и зимнее время, условно разделяются на 3 испытательных блока:

1) после заполнения объема рукава ГВС производится выдержка в 600 с (для полного образования однородной смеси и разделения газа на фракции). Только для экспериментов при отрицательной температуре окружающей среды;

2) после заполнения объема рукава ГВС выдержка не производится (происходит мгновенная детонация смеси);

3) в объем рукава устанавливаются преградительные конструкции и после заполнения рукава ГВС производится детонация без выдержки.

Взрыву смесей всегда предшествует образование облака, в котором горючий компонент присутствует в смеси с окислителем (как правило, с кислородом воздуха) в определенном диапазоне концентраций. Процесс взрыва этого облака может осуществляться разными способами, после чего взрывная волна распространяется в пределах облака со скоростью, достигающей до тысячи м/с.

Процесс взрывного горения газовой смеси в пределах облака и значения параметров, характеризующих ударную волну за его пределами, зависят от физико-химических свойств смеси, формы и объема облака на момент взрыва, от места инициирования взрыва (у центра или края облака).

Результаты экспериментов по первому блоку: при выполнении выдержки ГВС происходит ее разделение путем фракционной конденсации. В результате конденсат обогащается относительно менее летучими (высококипящими) компонентами, а несконденсировавшийся пар – более летучими (низкокипящими). За счет этого, в большей степени, происходит «горение» нижней фракции и мгновенное приращение (взрыв) верхней фракций, за счет чего мощность взрыва усиливается.

Результаты экспериментов по второму блоку: без выполнения выдержки смеси, ее разделение на фракции не происходит. За счет чего происходит дефлаграционный взрыв.

Для третьего эксперимента была произведена процедура схожая с первым и вторым экспериментами. Для повышения скорости и мощности протекания взрыва в объем рукавной линии были установлены преградительные конструкции, что позволило приблизить экспериментальные условия к реальным. Выдержка не производилась.

При сравнении результатов экспериментов с детонацией без выдержки (блок 1) и схожих экспериментов (блок 3), установлено, что при наличии преградительных стенов мощность протекания взрыва превышает мощность протекания без них. Из этого можно сделать вывод, что, в случае аварийной ситуации на производственном объекте нефтегазового комплекса, при наличии вблизи источника аварии или в селитебной зоне (подпадающей под зону

действия взрыва) зданий и строений, поражающая зона значительно увеличится.

Проведенные эксперименты были реализованы при концентрациях от 2,0 до 9,5 %, что является нижним и верхним концентрационным пределами. Стоит отметить, что максимальное значение теплового потока при отрицательной температуре смещено в область концентрационных пределов близких к верхнему пределу. При положительных температурах он находится в районе середины. Концентрация 8,0 % имеет наиболее мощный характер протекания взрыва.

На рисунке 5 представлены экспериментальные зависимости теплового потока, полученные при двух пограничных концентрациях. Как наглядно видно мощность протекания процесса взрыва при 2,0 и 8,0 % отличается на величину порядка 20 % с увеличением к верхнему концентрационному пределу.

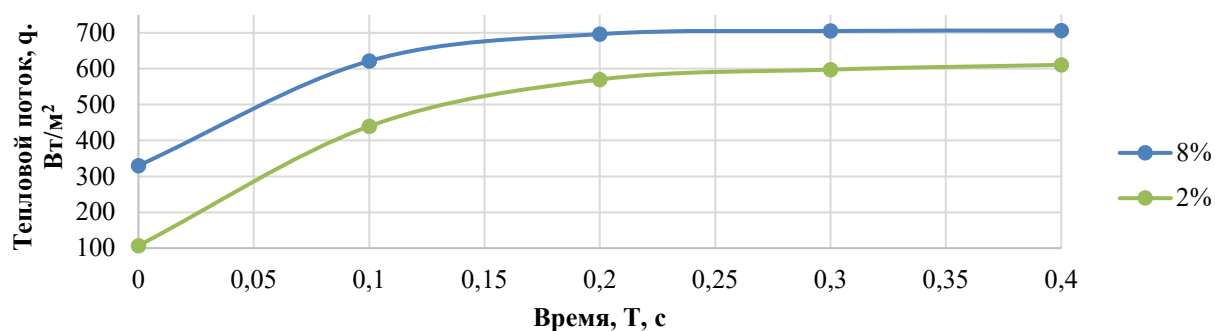


Рисунок 5 – Экспериментальные данные с датчика ДКТП, полученные при концентрациях газа 8 % и 2 % от основного объема рукава

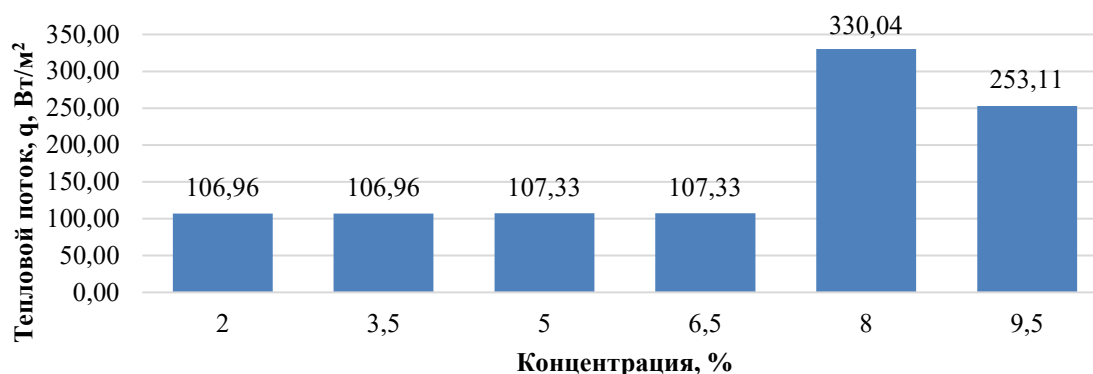


Рисунок 6 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от концентрации газа

На рисунке 6 представлена диаграмма экспериментальных данных для величин начального показания взрыва. Из него следует, что мощность протекания взрыва в начальной точке развития для концентраций при нижнем (2 %) и верхнем (8 %) концентрационных пределах отличается более чем в 3 раза.

При последующих экспериментах был произведен ряд повторений взрыва (38 раз) при различных температурных показателях окружающей среды при постоянной концентрации 8 % для выявления температуры, при которой тепловой поток при протекании взрыва будет максимальным.

На рисунке 7 представлена диаграмма экспериментальных данных для величин начального показания взрыва при различных температурах окружающей среды при фиксированной концентрации в 8 %.

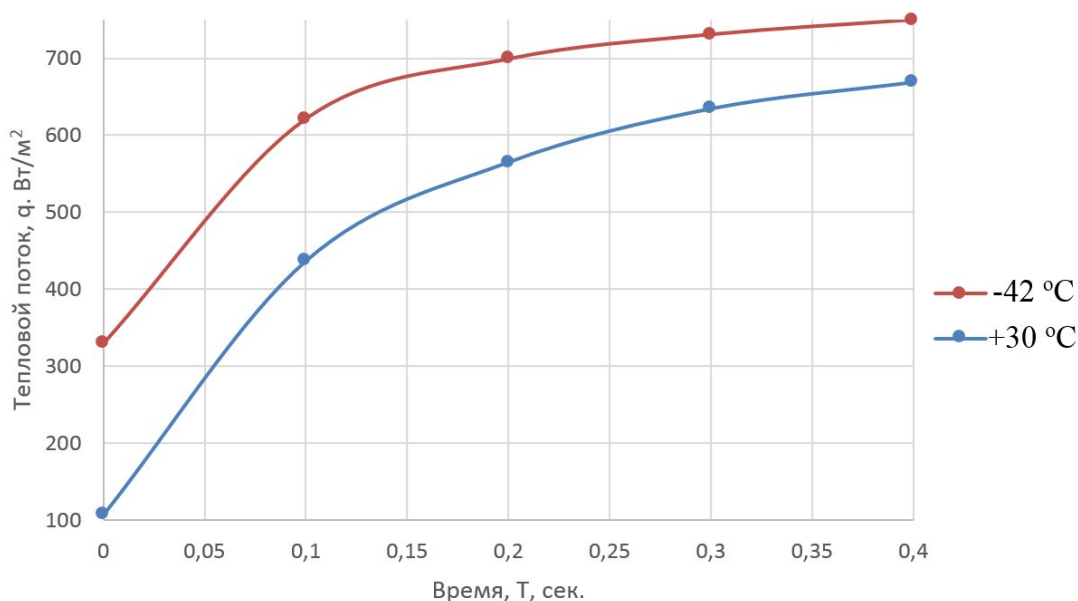


Рисунок 7 – Экспериментальные данные с датчика ДКТП, полученные при температурах -42 °C и +30 °C при постоянной концентрации 8 %

На рисунке 8 представлена диаграмма экспериментальных данных для величин начального показания взрыва при фиксированной концентрации в 8 %.

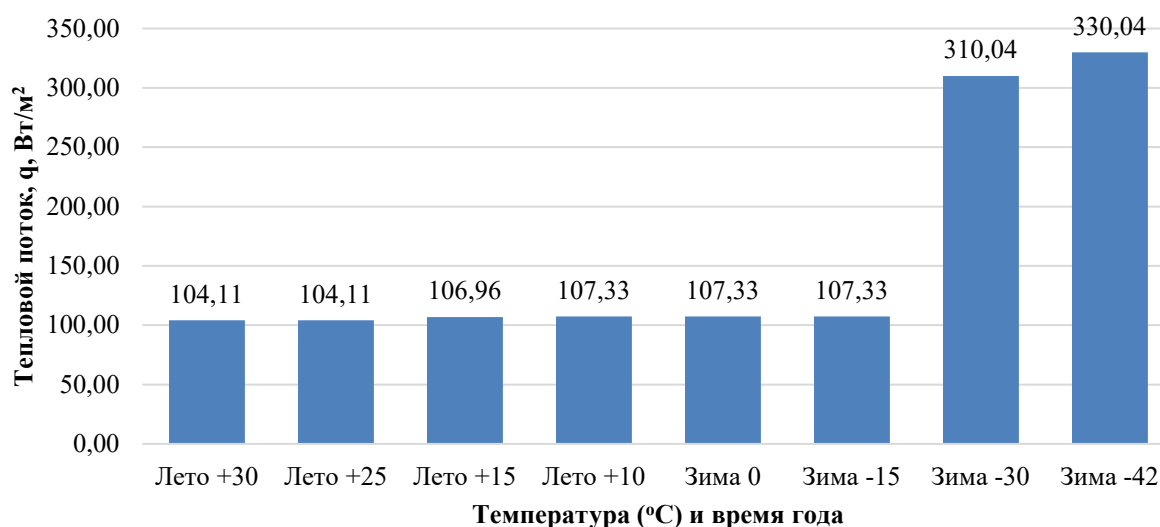


Рисунок 8 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от температуры и времени года в точке 1

Как видно из данного графика, при достижении критических отрицательных температур окружающей среды (ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходят скачкообразные изменения динамики при взрыве газовой смеси (протекает в 3 раза мощнее, чем при более высоких температурах).

Достоверность показаний прибора для определения мощности взрыва ГВС ($\text{Вт}/\text{м}^2$) оценивалась по сопоставимости результатов десятикратного испытания при схожих метеорологических условиях (температура окружающей среды, влажность воздуха, штиль), одинаковой концентрации смеси и определении абсолютной и относительной погрешностей. В доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значения средней относительной погрешности измерений и средней погрешности аппроксимации не превышают 5 %.

Для апробации исследования особенностей взрыва газовой смеси в условиях низких температур и подтверждения экспериментальных данных было произведено моделирование аварийного процесса взрыва смеси в замкнутом объеме посредством программного комплекса PromRisk.

Для этого выявлены наиболее неблагоприятные сценарии возникновения и развития пожароопасных ситуаций; выбраны методы прогноза неблагоприятных последствий при авариях; проведен прогноз неблагоприятных последствий и рассчитаны значения теплового потока. Получены величины теплового потока на различных расстояниях от края пролива (края площади пожара), которые отображены на рисунке 9.

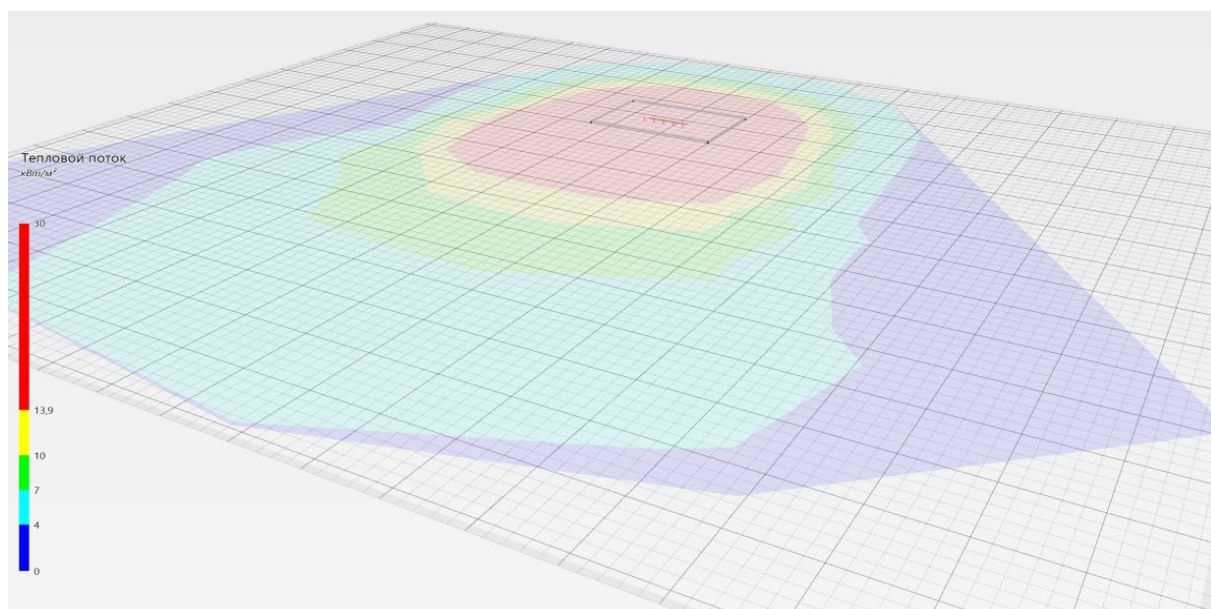


Рисунок 9 – Поле величин теплового потока при разрушении, пожаре пролива при температуре окружающей среды $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 0,4 секунде детонации

На рисунке 10 представлены зависимости теплового потока от расстояния от края пролива (пожара) при всех заданных вариантах силы ветра.

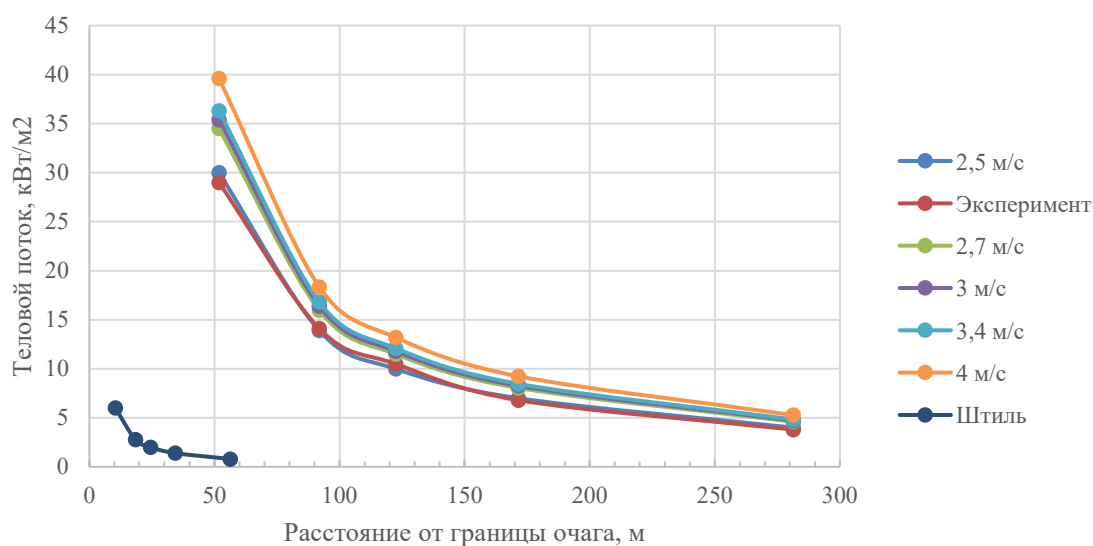


Рисунок 10 – Значения теплового потока при различной силе ветра при разрушении, пожаре пролива (температура окружающей среды – 30 °С на 0,4 секунде детонации)

Как наглядно видно из графика, представленного на рисунке 10, расхождение между расчетными величинами теплового потока при разрушении трубопровода для значения скорости ветра 2,5 м/с схожи с данными, полученными экспериментальным путем. Максимальное расхождение составило 4,81 %, что говорит о корректности поставленного эксперимента.

В результате проведенных исследований была установлена зависимость влияния низких температур на параметры теплового потока при взрыве ГВС и экспериментально подтверждена возможность измерения взрыва посредством применения разработанного метода и прибора в условиях различных температур окружающей среды.

Четвертая глава посвящена практическим рекомендациям по применению предложенного прибора для снижения аварийности при функционировании объектов нефтегазового комплекса.

На разработанные метод и прибор получены акты внедрения в Главное управление МЧС России по Красноярскому краю, в АО «КРАСНОЯРСКИЙ ГАЗ» и в учебный процесс Сибирского федерального университета.

Один из реализованных способов применения, разработанных метода и прибора контроля теплового потока, является автоматическая система, основанная на раннем обнаружении аварийной ситуации и последующем тушении газопорошковым комплексом. Прибор предназначен для работы в качестве адресного пожарного извещателя или в составе системы обнаружения как предаварийных ситуаций (опасный перегрев технологического оборудования), так и раннего обнаружения загораний любых углеродсодержащих материалов независимо от их агрегатного состояния по характерному инфракрасному излучению диоксида углерода.

Еще одним путем внедрения могут стать умные системы безопасности, которые сочетают в себе системы пожарной автоматики и робототехники, контроля и мониторинга поведения строительных конструкций и инженерных систем, видеоконтроля, газового анализа, аварийных систем аспирации, вентиляции, противовзрывной защиты.

Также существует возможность использования прибора контроля теплового потока в составе существующих систем обеспечения безопасности, что повысит скорость обнаружения взрыва ГВС, и тем самым позволит минимизировать ущерб от аварии за счет локализации распространения горения, являющимся последствием взрыва.

В **заключении** подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение научной задачи по разработке метода и прибора контроля теплового потока при взрыве газовой смеси в различных температурных условиях окружающей среды, служащей для повышения техногенной безопасности при освоении нефтегазовых месторождений северной территории Российской Федерации.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведены исследования параметров взрыва газовой смеси при различных температурах окружающей среды. Выявлены закономерности протекания взрыва при различных концентрациях газовой смеси, установлено влияние состояния окружающей среды на динамику взрыва.

2. Установлено, что под влиянием температур окружающей среды ниже минус 30 °С мощность протекания взрыва ГВС увеличивается в 3 раза по сравнению с аналогичными процессами при более высоких температурах.

3. Разработан метод контроля теплового потока при взрыве газовой смеси, позволяющий проводить исследования при разных температурах окружающей среды, в том числе при температурах ниже минус 30 °С. Разработанный метод отличается простотой, высокой точностью измерения и погрешностью 1 %.

4. Разработан прибор контроля теплового потока при взрыве ГВС со следующими техническими характеристиками: время срабатывания - не превышает 0,1 с, скорость обнаружения пламенной зоны составляет 0,025 с, температурный диапазон эксплуатации находится в пределах от -70 до + 65 °С, а дальность обнаружения очага взрыва составляет не менее 100 м, что превышает установленные требования и, таким образом, превосходит по этим характеристикам существующие аналоги.

5. Разработаны практические рекомендации по применению предложенных метода и прибора для обнаружения пожара ПГ в составе

предложенной автоматической системы раннего обнаружения, а также для уменьшения возможных рисков и снижения аварийности при функционировании объектов производства, хранения и транспортировки газа в условиях низких температур. Определены дальнейшие этапы исследования работы.

Дальнейшие исследования планируется вести в следующих направлениях:

1. Применение разработанного датчика контроля теплового потока в автоматической системе взрывоподавления для минимизации потерь от взрывов метанопылевоздушных смесей в угольных шахтах и системах роботизированного пожаротушения.

2. Обеспечение интеграции датчика контроля теплового потока в уже существующие технологические системы объектов.

3. Исследование параметров взрыва ГВС при низких температурах в закрытом объеме для повышения техногенной безопасности строений на нефтегазовых месторождениях северной территории Российской Федерации.

Работы, опубликованные автором по теме диссертации

а) статьи в журналах, входящих в Web of Science и SCOPUS:

1. Krekhov, A.A. The upgrade heat flux sensor application for early fire detection / S.V. Klochkov, A.N. Minkin, S.N. Masaev // Journal of Physics: Conference Series – 2020.

2. Krekhov, A.A. Gas-air mixture explosion behaviour research at different temperatures / S.V. Klochkov, A.N. Minkin, D A Edimichev, E V Chistova// Journal of Physics: Conference Series – 2021.

б) статьи в российских журналах, включенные в текущий перечень ВАК:

3. Крехов, А.А. Альтернативный подход к автоматизации независимой оценки пожарного риска [Текст] / А.А. Крехов, О.Ю. Воробьев, С.В. Клочков, А.Н. Минкин // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 1. – С. 46-51

4. Крехов, А.А. Определение величины потерь вследствие излучения от продуктов сгорания в узком канале [Текст] / А.А. Крехов, А.Н. Минкин, С.В. Клочков // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 2. – С. 28-32.

5. Крехов, А.А. Применение датчика контроля теплового потока для раннего обнаружения образования взрывной концентрации газовой смеси в условиях низких температур [Текст] / А.А. Крехов, Ю.Н. Безбородов, С.В. Клочков, А.Н. Минкин // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 2. – С. 33-38.

6. Крехов, А.А. Исследование параметров взрыва при низких температурах [Текст] / А.А. Крехов, С.В. Клочков, А.Н. Минкин, Е.В. Чистова, Т.М. Пашкина // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – № 3. – С. 56-63.

в) патент на полезную модель:

7. Датчик контроля теплового потока [Текст]: пат. RU 195452 U1 Рос. Федерация: МПК G 08 B 17/113/ Крехов А.А., Клочков С.В., Минкин А.Н., Едимичев Д.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2019123250; заявл. 18.07.18; опубл. 28.01.20, Бюл. № 4. – 2 с.

з) работы в других изданиях:

8. Крехов, А.А. Взрыв газо-воздушной смеси при низких температурах [Текст] / А. А. Крехов, А.В. Петров // Молодая нефть: сб. статей Всерос. молодежной научн.-техн. конф. Нефтегазовой отрасли / отв. за выпуск О.П. Калянина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 119-127.

9. Крехов, А.А. Разработка и совершенствование способов моделирования развития пожара и взрыва с учетом особенностей протекания процессов в условиях Крайнего Севера [Текст] / А.А. Крехов, А.А. Дектерев // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3 (3). – С. 144-148.

10. Крехов, А.А. Метод и средства контроля фиксации взрыва газовой смеси в условиях низких температур [Текст] / А.А. Крехов, Ю.Н. Безбородов // Молодая нефть: сб. статей IV Всерос. молодежной научн.-техн. конф. Нефтегазовой отрасли – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 362-366.

11. Крехов, А.А. Исследование особенностей взрывов газовой смеси на промышленных предприятиях в условиях низких температур [Текст] / А.А. Крехов, А.А. Дектерев // Прогрессивные технологии и процессы: сб. научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции в 3-х томах / отв. за выпуск А.А. Горохов – Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2015. – С. 105-109.

12. Крехов, А.А. Определение расчётной величины пожарного риска противорадиационного укрытия [Текст] / А.А. Крехов, А.Н. Минкин, С.В. Клочков, М.В. Елфимова // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Железногорск, 2018. – С. 64-67.

13. Krekhov, A.A. Gas and air mixture explosion features exploration under low temperature conditions / A.A. Krekhov, Y.N. Bezborodov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin A.N. // Actual issues of polychotomic analysis. – 2019. – P. 29-46.

14. Krekhov, A.A. Heat flux sensor application for early detection of explosive gas-air concentration formation at low temperatures / A.A. Krekhov, Y.N. Bezborodov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin // Siberian Fire and Rescue Bulletin. – 2019. – № 2 (13). – P. 33-38.

15. Krekhov, A.A. Enhanced heat flow control sensor application for early fire detection / A.A. Krekhov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin, S.N. Masaev // International scientific conference ICMSIT-2020: metrological support of innovative technologies. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. – 2020.