

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
канд. техн. наук, доцент  
Минкин Андрей Николаевич

Красноярск – 2022

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение.....	5
Глава 1      Анализ методов и приборов контроля теплового потока при взрыве газовой смеси .....	10
1.1    Методы оценки пожаровзрывоопасности газовой смеси.....	10
1.2    Процесс распространения пламени в замкнутом объеме при взрыве газовой смеси .....	12
1.3    Анализ существующих приборов и методов контроля теплового потока при взрыве газовой смеси .....	22
1.3.1. Приборы измерения теплового потока .....	22
1.3.2    Методы фиксации аварийной ситуации при взрыве ГВС.....	23
1.4    Выводы по главе .....	29
Глава 2      Разработка метода и прибора контроля теплового потока при взрыве газовой смеси .....	30
2.1    Разработка метода контроля теплового потока при взрыве газовой смеси .....	30
2.1.1    Концепция и компоновка испытательного стенда.....	37
2.1.2    Расчет концентрации и объема газовой смеси .....	38
2.1.3.    Выбор температурных условий проведения эксперимента.....	39
2.1.4    Особые условия проведения эксперимента.....	40
2.2    Разработка прибора контроля и фиксации взрыва газовой смеси .....	40
2.2.1    Патент на полезную модель .....	40
2.2.2    Принцип работы устройства и его характеристики.....	46
2.2.3    Область применения и метрологические данные .....	49
2.3    Выводы по главе .....	50
Глава 3      Результаты проведения эксперимента по контролю теплового потока при взрыве газовой смеси в условиях низких температур.....	51
3.1    Тарировочные поправки для снятия физических величин посредством	

датчика контроля теплового потока .....	51
3.2 Условия взрыва газоздушнoй смеси .....	62
3.3 Результаты натурных испытаний с учетом полученных данных с фиксирующего оборудования .....	64
3.3.1 Первый испытательный стенд .....	65
3.3.2 Второй испытательный стенд .....	67
3.3.3 Третий испытательный стенд.....	69
3.4 Зависимости мощности взрыва от времени по параметру концентрации..	72
3.5 Моделирование аварийного процесса ГВС в замкнутом объеме посредством программного комплекса FireCat PromRisk.....	82
3.5.1 Разгерметизация 20 мм .....	85
3.5.2 Разгерметизация 110 мм .....	92
3.5.3 Разрушение.....	97
3.5.4 Сценарий 1. Разгерметизация 20 мм, пожар пролива.....	102
3.5.5 Сценарий 2. Разгерметизация 110 мм, пожар пролива.....	110
3.5.6 Сценарий 3. Разрушение, пожар пролива.....	116
3.6 Метод обработки экспериментальных исследований .....	122
3.7 Выводы по главе .....	127
Глава 4 Практические рекомендации по применению предложенного прибора для снижения аварийности при функционировании объектов производства, хранения и транспортировки ПГ в условиях низких температур .....	128
4.1 Технология применения разработанного метода и прибора контроля для создания технических устройств обеспечения безопасности на объектах промышленного комплекса .....	128
4.2 Технология применения разработанного датчика в качестве контроля взрыва газоздушнoй смеси в условиях низких температур .....	131
4.3 Выводы по главе .....	132
Заключение .....	133
Список литературы .....	135
Приложение А Перечень аварий газопроводов из открытых источников при	

минусовых температурах окружающей среды в период с 1989 г. по 2019 г. ....	148
Приложение Б Акт внедрения в учебный процесс Института нефти и газа ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» результатов работы.....	155
Приложение В Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно- конструкторских и технологических работ в деятельность «ГУ МЧС РФ по Красноярскому краю».....	156
Приложение Г Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно- конструкторских и технологических работ в деятельность АО «Красноярсккрайгаз» .....	1567
Приложение Д Патент на полезную модель №195452 «Датчик контроля теплового потока» .....	1578

## ВВЕДЕНИЕ

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). [1] 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 [2-6], 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 [3, 4, 6]. При

изучении влияния природных воздействий акцент ставится в основном на подвижки грунта, но при этом температурные воздействия, в том числе влияние низких температур, остаются малоизученными.

Проведенный анализ известных аварийных ситуаций на территории Российской Федерации с 1989 г. по 2019 г. [7] показывает, что если прорыв газопровода образовался при низких температурах окружающего воздуха, то пожар возникает в 66% случаях. Это связано с тем, что при крайне низких температурах 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 [8]. В то же время процесс ликвидации аварийной ситуации (пожаротушение) в арктических условиях является затруднительным в связи со спецификой процесса тушения [9].

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.

**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 газозвушной смеси по изучению величины теплового потока.
2. Разработать метод и прибор контроля взрыва газозвушной 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 повышение техногенной безопасности при освоении нефтегазовых месторождений северной территории Российской Федерации.

**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.

#### **Практическая значимость работы:**

На основе теоретических и экспериментальных исследований в работе предложен метод контроля теплового потока при взрыве газовой смеси (далее – 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.

**Методология и 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.

**Основные положения, выносимые на защиту.** 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.

**Достоверность результатов исследования** доказана теоретически и экспериментально, аргументированы научные положения. 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 работы.** 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.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в т. ч. четыре работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, две в базе данных SCOPUS, получен патент на полезную модель RU 195452 U1, 28.01.2020 [46].

**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 повышения эффективности функционирования объектов производства, хранения и транспортировки ПГ в специфических условиях Крайнего Севера.

**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.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 159 страниц, 21 таблица, 72 рисунка, 66 формул. Список литературы включает 106 наименований.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

## 1.1 Методы оценки пожаровзрывоопасности газов душных смесей

Существующие исследования [10-15] отмечают, что в момент разрушения технологического оборудования с воспламеняющимися составами и трубопровода резервного парка возникает большая вероятность выброса горючих составов либо внутрь здания, либо в атмосферу с образованием ГВС. Взрыв такой смеси опасен как для зданий, технологического оборудования, находящегося в них, так и для рабочего персонала ГВС [16, 17].

Методы защиты людей (персонала) и оборудования от возможного взрыва можно определить только после того, как произведена оценка опасности технологического процесса и перерабатываемой среды.

Авторы [5-19] выделяют два основных метода решения проблемы оценки опасности: детерминированный и вероятностный.

В России, в соответствии с нормативными документами [20-21] в качестве показателей пожаровзрывоопасности приняты: максимальное давление взрыва  $P_{max}$ , скорость повышения давления во время взрыва  $dp/dt$ , нормальная скорость распространения пламени  $U_n$ , минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора  $\Phi_f$ , минимальная энергия зажигания  $E_{min}$ , температура воспламенения  $T_v$  и др. Данные показатели используются при разработке мероприятий по пожаровзрывобезопасности технологических процессов.

Максимальное давление взрыва и скорость его нарастания зависят от многих факторов. Начальное содержание кислорода, как отмечают авторы исследований [5-19], влажность горючей смеси, наличие инертных добавок могут снижать давление при взрыве [22-24]. По данным Таубкина С. И. и Таубкина И.С. [25]

существенное влияние на давление взрыва оказывает форма твердых частиц и их концентрация.

По свидетельству Большакова А.М. и Сидоренко В.И. давление взрыва также зависит от формы и размеров сосуда [17, 26], в котором происходит горение. При наличии нескольких таких емкостей, соединенных между собой, возможно повышение давления, по сравнению с расчетом при распространении пламени из одного аппарата в другой [27, 28]. Данные показатели нашли широкое применение в оценке взрывоопасности промышленных объектов [29-32]. Авторами [33] введены два комплексных показателя, характеризующих воспламеняемость и взрываемость смесей. Первый объединяет температуру воспламеняемости  $T_v$ , минимальную энергию зажигания  $E_{min}$  и нижний предел концентрации распространения пламени НКПР, а второй - скорость роста давления  $dp/d\tau$  и максимальное давление взрыва  $P_{max}$ .

Величина взрывоопасности пылевоздушных смесей является произведением этих двух показателей и определяется по формуле (1.1).

$$K = \frac{[НПВ \cdot T_v \cdot E_{min}]_{эм}}{[НПВ \cdot T_v \cdot E_{min}]_{об}} \cdot \frac{[P_{max} (dp / d\tau)_{max}]_{об}}{[P_{max} (dp / d\tau)_{max}]_{эм}}, \quad (1.1)$$

где  $НПВ$  – нижний предел взрываемости;

$T_v$  – температура воспламеняемости;

$E_{min}$  – минимальная энергия зажигания;

$P_{max}$  – максимальное давление взрыва;

$dp/d\tau$  – скорость роста давления.

Индекс «об» относится к исследуемому образцу, «эм» - к эталонному.

В Венгрии исследователь Бартнеч предложил оценку взрываемости производить критерием «К» (1.2) [34]:

$$K = (dp/d\tau)_{\max} \frac{P_{\max}}{\tau}, \quad (1.2)$$

где  $\tau$  - время нарастания давления, с

В Германии Merck Millipore в качестве классификационного параметра предложил величину  $K_p$ , определяемую по формуле (1.3).

$$K_p = (dp/d\tau)_{\max} V^{1/3}, \quad (1.3)$$

где  $V$  – нижний предел взрываемости.

Однако, даже введение комплексных показателей взрывоопасности обращающихся веществ, не дает в полном объеме провести оценку потенциальной опасности технологического оборудования.

В связи с этим учеными нашей страны Ю.А. Дадоновым, М.В. Лисановым, Ю.В. Лисиным, А.С. Печеркиным, В.И. Сидоровым представлена методология комплексной оценки взрывоопасности технологических установок [35], которая учитывает частоту и характер аварий, наблюдавшихся при эксплуатации нефтегазовых производств, параметры обращающихся веществ, характер технологического процесса (Меньшиков П.В, Таубкин С.И., Таубкин И.С.) [25, 36], наличие внутренних и наружных источников воспламенения, надежность оборудования, средств контроля и регулирования, степень надежности систем защиты (Имайкин Г.А.) [37, 38, 39] и т.д.

## **1.2 Процесс распространения пламени в замкнутом объеме при взрыве газовой смеси**

При анализе процесса распространения пламени в объеме конечных размеров необходимо исходить из совместного рассмотрения уравнений теплопроводности

и диффузии [40] с учетом выделяемого тепла и расходования исходного вещества в ходе химической реакции [41]. По существу, эти уравнения являются уравнениями теплового и материального баланса системы. Модель распространения пламени в пространстве можно представить, как некоторый выделенный элемент пространства, в котором находится смесь из двух реагирующих газов и продуктов реакции. Изменение теплосодержания смеси, находящейся в этом элементе за бесконечно малый интервал времени вызвано следующими причинами: через границы элемента втекает и вытекает некоторое количество газа, соответственно вносящего в элемент и выносящего из него свое теплосодержание. Это изменение теплосодержания связано, очевидно, с общим движением газа (конвективный поток), с молекулярным потоком тепла, связанного с наличием градиента температуры и концентрации. Далее, часть тепла, проносимого этим потоком, задерживается в элементе и идет на изменение его теплосодержания. Внутри элемента выделяется некоторое количество тепла за счет химической реакции. Аналогичные члены входят в уравнение материального баланса выделенного элемента. Изменение концентрации смеси за бесконечно малый интервал времени связано в этой формуле с конвективным потоком вещества через границы элемента молекулярным потоком, вызванным градиентом концентрациями, а также протеканием химической реакции. С учетом этих замечаний уравнение распространения тепла и вещества в векторной форме запишется в виде (1.4):

$$C_p \rho \frac{dT}{d\tau} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T + K_T D C_p \operatorname{grad} C + q_{\text{луч}}) + \Delta H_{\text{хим}}(C, T), \quad (1.4)$$

$$\rho \frac{dC}{d\tau} = \operatorname{div}(D \rho \operatorname{grad} C + K_T D \frac{\rho C}{T} \operatorname{grad} T) - W(C, T),$$

где  $\frac{d}{d\tau} = \frac{d}{dt} + \frac{d}{dx} \frac{dx}{d\tau} + \frac{d}{dy} \frac{dy}{d\tau} + \frac{d}{dz} \frac{dz}{d\tau}$  – полная субстанциональная производная по времени, состоящая из двух членов местной (локальной) и конвективной производных;

$\lambda \text{ grad } T$  – поток молекулярного переноса тела диффузионной теплопроводностью;

$K_T D C_p \text{ grad } C$  – поток переноса тепла диффузионной теплопроводностью;

$q_{\text{луч}}$  – поток переноса тепла излучением;

$\Delta H(C, T)$  – количество тепла, выделяющееся в единицу времени и в единице объема

$D\rho \text{ grad } C$  – поток вещества диффузией;

$K_T D \frac{\rho C}{T} \text{ grad } T$  – поток вещества термодиффузией;

$w(T, C)$  – количество вещества, реагирующего в единицу времени в единицу объема.

Таким образом, рассмотрение устойчивости и колебания реакционной зоны в проточной системе с учетом неоднородности температур требует анализа уравнения переноса энергии в частных производных. Чтобы избежать этого, в работе [40] рассматривается идеализированный предельный случай, который называют реактором идеального смешения.

Баланс тепла всей системы в модели идеального смешения представляется без учета пространственного распределения температур, таким образом, что средние значения величин, зависящих от температуры, заменяются значением этих величин при средней температуре (по объему).

Ошибка усреднения, возникающая при таком подходе, несущественно влияет на качественные выводы и касается только численных множителей, значения которых находятся из стационарной теории распространения фронта пламени.

На рисунке 1.1 представлена модель реактора идеального смешения. Концентрация и температура в таком реакторе меняются как за счет реакции и теплоотвода, так и за счет поступления тепла со входящим потоком и уносом их с уходящим.

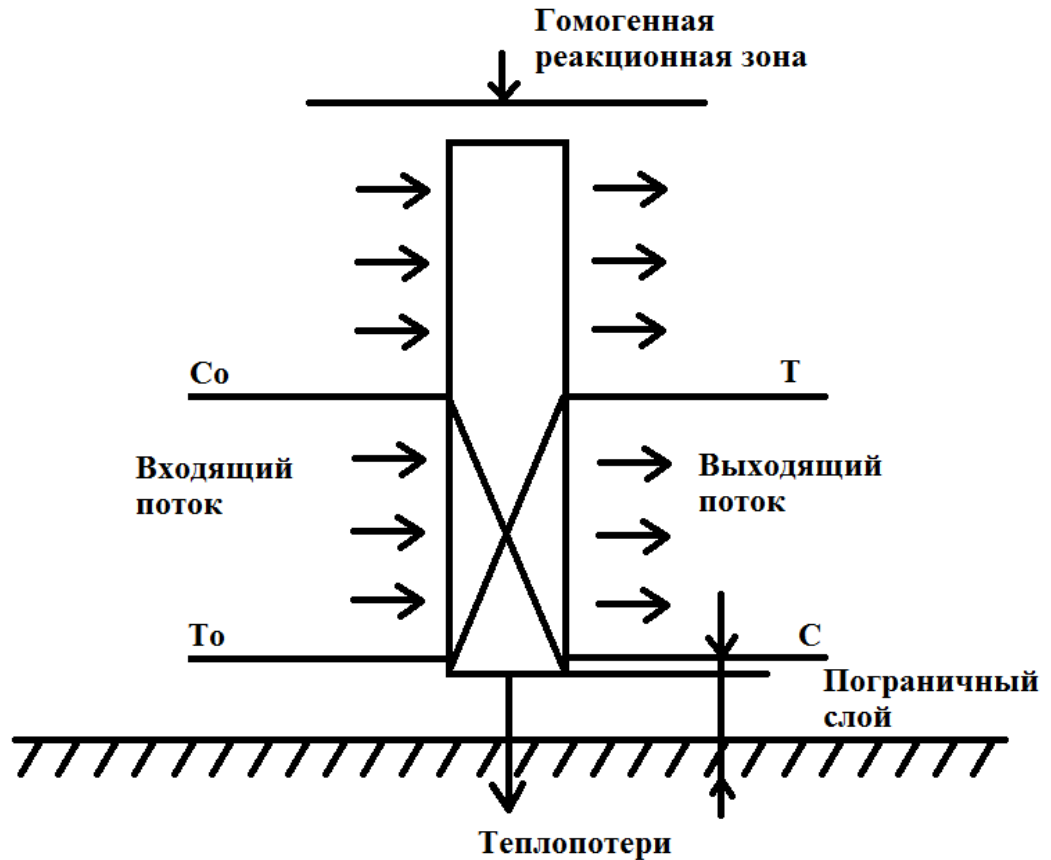


Рисунок 1.1 – Модель реактора идеального смешения

Система уравнений гомогенной реакционной зоны для простой кинетики (без учета промежуточных продуктов) может быть представлена формулой (1.5):

$$\begin{aligned} \frac{dC}{d\tau} &= V(C_0 - C) - W(C), \\ \rho C_p \frac{dT}{d\tau} &= \Delta H_{\text{полн}} - h(T - T_0), \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $C_0$  – концентрация вещества, вступающего в реакцию;

$W(C)$  – скорость реакции в зависимости от концентрации вещества;

$V$  – коэффициент, описывающий скорость поступления вещества в реактор и нося продуктов из реактора;

$\Delta H_{\text{полн}}$  – полная энтальпия потока;

$h$  – коэффициент, описывающий теплоотдачу и унос тепла выходящим

потоком;

$T$  – температура выходящего потока;

$T_0$  – температура входящего потока.

Коэффициент, описывающий скорость поступления вещества в реактор и выноса продуктов из реактора может быть по физическому смыслу обратной величиной времени пребывания смеси в реакторе ( $\tau$ ) (1.6):

$$B = \frac{u}{\alpha} = \frac{1}{\tau}, \quad (1.6)$$

где  $u$  – линейная скорость потока;

$\alpha$  – длина реактора.

Наряду с вышеуказанными допущениями в модели также было принято, что:

– теплопроводность стенки считается бесконечно большой, т.е. принимается, что тепловое сопротивление будет приходиться не на стенку, а на прилегающий к ней пограничный слой;

– движение газов не является турбулентным;

– кинетическая энергия газов мала по сравнению с теплосодержанием.

На базе вышеуказанной модели рассматривается задача о росте давления взрыва в ограниченном объеме пространства.

Используем установленные закономерности на примере: разгерметизация на газопроводе, которая привела к возникновению взрыва. Во время аварии, сопровождающейся разгерметизацией газопровода, начинает происходить следующее: о том, что произошла сработка арматуры говорит падение давления газа [42]; запорная арматура закрывается; газ начинает выходить из участка газопровода, который отсечен арматурой [43, 44, 45].

Высокое давление вызывает выход газа в атмосферу в тех местах, где произошло повреждение. В местах разрушения в земле образуется воронка. Физическое свойство метана заставляет его подняться в атмосферу. Здесь же присутствуют и другие газы, имеющие в своем составе определенные смеси,



которые опускаются и оседают в приземном слое. В это же самое время наибольшую опасность представляет «облако взрывоопасной смеси», которое образуется в процессе смешивания газов и окружающего воздуха.

Существующие данные [46] определяют, что около 80 % случаев аварий протекает с реализацией пожара, в связи с образованием искр в результате взаимодействия частиц газа с металлом или твердыми частицами грунта. Протекающее локальное горение с большой долей вероятности сменится взрывом посредством процесса самоускорения горения по ландшафту местности и в лесозоне.

Следовательно, во время аварии на газопроводе горение во время взрыва будет протекать по одному из двух вариантов - дефлаграционному или детонационному. При прогнозировании принимается, что процесс развития будет происходить в режиме детонации.

Граница распределения облака взрывоопасной смеси в направлении ветра определяется по эмпирической формуле (1.7):

$$L = 25 \sqrt{M / W}, \quad (1.7)$$

где 25 – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность  $\text{м}^{3/2}/\text{кг}^{1/2}$ ;

$M$  – массовый секундный расход газа,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$W$  – скорость ветра,  $\text{м}/\text{с}$ .

Границу зоны детонации с ограниченным радиусом  $r_0$ , образующуюся при повреждении герметичности трубопровода и сопровождающуюся выходом газа на поверхность, можно описать формулой (1.8):

$$r_0 = 12,5 \sqrt{M / W}, \quad (1.8)$$

Массовый секундный расход газа  $M$  при реализации наихудшего сценария распространения, где величина скорость изливания и расход зависят от

характеристик трубопровода, рассчитывается по формуле (1.9):

$$M = \Psi \cdot F \cdot \mu \sqrt{P_r / V_r}, \quad (1.9)$$

где  $\Psi$  – коэффициент расхода газа от состояния потока (при звуковой скорости истечения  $\Psi=0,7$ );

$F$  – площадь отверстия истечения, берется равной площади сечения газопровода,  $m^2$ ;

$\mu$  – коэффициент расхода, учитывающий отверстие ( $\mu = 0,7 \dots 0,9$ ), при расчете принимается  $\mu = 0,8$ ;

$P_r$  – давление газа в трубопроводе, Па;

$V_r$  – удельный объем транспортируемого газа при параметрах в трубопроводе, определяется по (1.10).

$$V_r = R_0 \frac{T}{P_r}, \quad (1.10)$$

где  $T$  – температура транспортируемого газа, К;

$R_0$  – удельная газовая постоянная, определяемая по данным долевого состава газа и молярным массам компонентов смеси из соотношения (1.11):

$$R_0 = 8314 \sum_{i=1}^n q_k / m_k, \quad (1.11)$$

где 8314 – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль×К);

$q_k$  – долевого состав газа;

$m_k$  – молярная масса компонентов, кг/кмоль;

$n$  – число компонентов.

При прогнозировании последствий аварии на газопроводе зоны детонации и воздушной ударной волны принимают с учетом направления ветра [47, 48]. При

этом считается, что зона детонации распространяется от газопровода по направлению ветра на расстояние  $2r_0$ . Направление ветра может вызвать смещение взрывоопасной смеси в любую сторону от газопровода. Поэтому, при прогнозировании, условно считается, что зона детонации имеет две полосы на протяжении всей границы с обеих сторон газопровода и имеет ширину  $2r_0$ . [48]. Вдоль этих полос, минуя границу детонации, располагаются зоны, в которых действует взрывная волна. На поверхности земли эти зоны выглядят как участки полос на протяжении всего газопровода.

При проектировании раздела «Инженерно-технических мероприятий гражданской обороны по предупреждению чрезвычайных ситуаций» (ИТМ ГО и ЧС) на протяжении всей границы магистральных газопроводов на планах местности обычно наносят зоны предполагаемых сильных разрушений. Как правило, границы определяются избыточным давлением в 50 кПа и радиусом разрушения, которое оно образует [49].

Все вышеуказанные варианты, моделирующие взрыв смесей газа в открытом пространстве [50], а также взрыв, возникающий при разгерметизации магистрального газопровода во время аварии, разработаны так, чтобы учитывалась их реализация при обычном режиме функционирования объекта, то есть при отсутствии влияния внешних факторов, основным из которых является отрицательная температура окружающей среды. Остановимся более детально на авариях газопроводов в данных условиях.

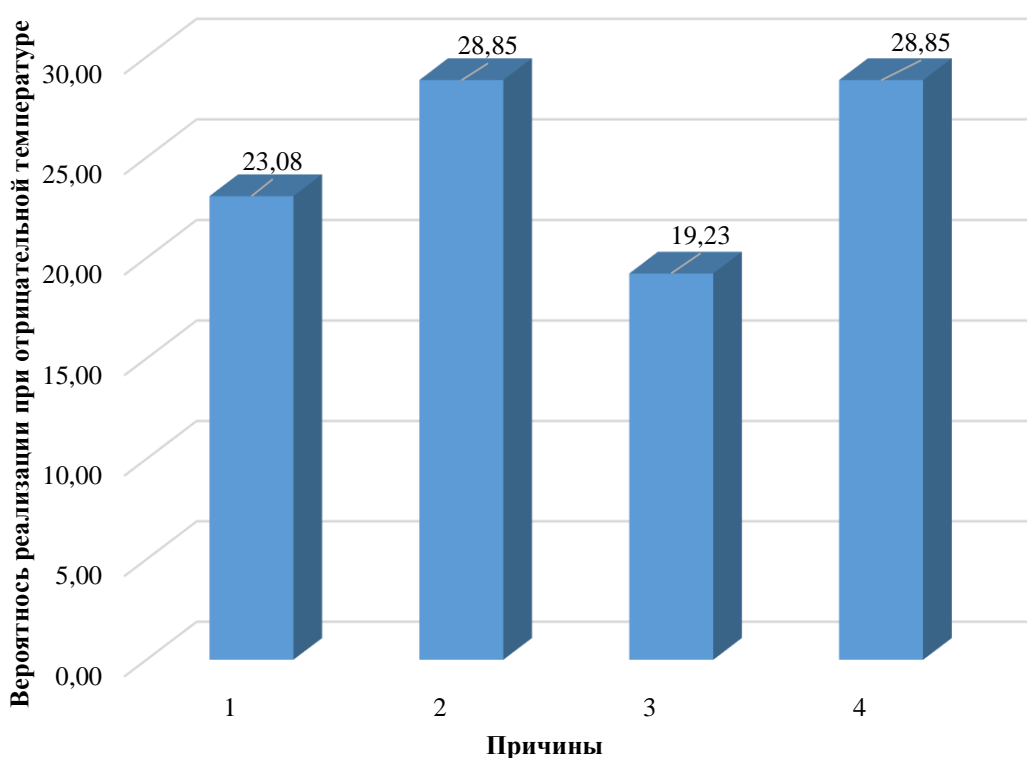
Эксплуатация газопроводов осложняется наличием большого количества сварных [51] и фланцевых стыков [10], регулирующей и запорной арматуры, а также высоким уровнем внутренних напряжений, связанных с постоянным испытанием и перемещением значительных объемов веществ. Разрушение газопровода может произойти даже при незначительном отклонении реальных условий эксплуатации от тех, которые приняты в проектной документации.

Функционирование газопроводов значительно усложняют низкие температуры [29, 44, 52]. Как правило, именно они повышают риск возникновения

аварийной ситуации во время контроля линейной части и в процессе поддержания технологических режимов.

Проанализируем известные аварийные ситуации на газопроводах при отрицательных температурах окружающей среды (Приложение 1) [46] с дополнением вышеуказанной статистики свежими данными из открытых источников.

Проведя глубокий анализ аварий, указанных в Приложении 1, был сделан вывод об основных причинах повреждений газопровода при минусовых режимах работы [10, 52, 53]. К ним относятся коррозия, деформация и дефекты трубы с отказом запорной арматуры, а также непосредственно влияние низких температур. Сводные данные представлены на рисунке 1.2.



1 – усталость металла; 2 – коррозия, деформация и дефекты трубы; 3 – влияние отрицательно низких температур; 4 – отказ запорной арматуры.

Рисунок 1.2 – Причины аварий газопроводов из открытых источников при отрицательных температурах окружающей среды в период с 1989 г по 2019 г.

О том, насколько разрушен газопровод, свидетельствует сам процесс протекания аварии [54]. Разгерметизация, возникшая при отрицательной температуре окружающей среды, происходит внезапное и хрупкое разрушение газопровода [54].

Высокое эквивалентное напряжение ниже возможного порога текучести материалов, составляющих конструкцию трубопровода, вызывает мгновенное разрастание магистральной нецелостности.

При повреждении трубопровода образуются осколки, разлет которых представляет собой большую опасность. Этот факт был проанализирован, разработан и изложен в работах [55, 56]. Установлена зависимость разрушения газопроводов от вида содержащейся в них стали. Если стали имеют не очень большую вязкость, то при аварии образуются некрупные осколки [57].

Природный газ в процессе транспортировки в связи с оказываемым на него давлением расширяется, газопровод разрывается и путем сжатия образуются воздушные ударные волны. При этом возникают барические эффекты.

Согласно изученным данным об авариях на трубопроводах ПГ (Приложение 1), установлено, что пожар возникает в 66 % случаях, если прорыв магистрального газопровода произошел при низких температурах окружающего воздуха [9].

Форма горения газа напрямую связана с наличием источника зажигания, образующегося при выбросе газа. При образовании источника зажигания газ имеет струйное горение или пожар принимает вид «колонны». С учетом отсутствия источника зажигания и неблагоприятных метеорологических условиях (температурная инверсия вместе со штилем), образуется облако метана, состоящее из взрывоопасной газообразной смеси [58].

В зарубежных [57] и отечественных источниках [49, 51] неоднократно рассматривались взрывы, происходящие на открытой местности, сопровождающиеся облаком ГВС ПГ. В этих работах предполагалось, что взрыв ПГ не представляет никакой опасности в виду своей химической стабильности, достаточно низких плотности и скорости взаимодействия кислорода со смесью ПГ. Установлено, что такая опасность все же существует. Неблагоприятные

метеорологические условия Севера, сопровождающиеся аномально низкими температурами и продолжительными штилями, не позволяют ГВС рассеиваться, вызывая ее большую концентрацию. Поэтому в случае, если присутствует источник зажигания, то вместе с образованием опасных концентрационных пределов возникает высокая вероятность возникновения взрыва [43].

Для минимизации потерь и возможности предотвращения аварийных ситуаций разрабатываются приборы измерения взрыва и протекающих теплофизических процессов.

### **1.3 Анализ существующих приборов и методов контроля теплового потока при взрыве газозудной смеси**

#### **1.3.1. Приборы измерения теплового потока**

Извещатели (датчики обнаружения пожара или взрыва) выступают одним из основных компонентов системы противопожарной защиты (ППЗ) объектов различного функционального назначения. Объекты нефтегазового комплекса, в первую очередь, требуют подобную защиту. Выбор оптимального по типу датчика, правильная его установка и соблюдение условий эксплуатации позволяют повысить эффективность применения извещателей и их работоспособность [59, 60]. Рассмотрим принцип действия основных типов датчиков, используемых в системах противопожарной защиты [61, 62].

При создании эффективной системы пожарной защиты необходимо учитывать быстродействие извещателей. В зависимости от вида извещателя его быстродействие составляет:

дымовые	30 – 300 с
тепловые	60 - 900 с
тепловые дифференциальные	60 – 300 с

датчики пламени

3-5 с

Так как в работе необходимо фиксировать параметры взрыва, протекающие с огромной скоростью, то за основу принимаем датчики пламени, а именно инфракрасные датчики, но они имеют ряд ограничений:

- очаг должен быть расположен в пределах чувствительной зоны извещателя, определяемой углом обзора;
- с учетом естественных и искусственных препятствий чувствительность извещателя должна позволять регистрировать разницу температур поверхности очага и окружающего фона.

Наиболее частое применение инфракрасных датчиков обусловлено рядом преимуществ, таких как:

- экологическая безопасность, связанная с пассивным принципом их действия и отсутствием каких-либо излучений;
- высокие эксплуатационные характеристики.

В таблице 1.1 представлено сравнение характеристик вышеописанных приборов.

Как видно из данных таблицы 1.1, среднее время срабатывания всех представленных извещателей составляет порядка 10-12 с, что является недостаточным для возможности снятия физических показаний при взрыве ГВС.

Следующим этапом проведем анализ методов фиксации (измерения) аварийной ситуации.

### **1.3.2 Методы фиксации аварийной ситуации при взрыве ГВС**

Методы различаются между собой по типу фиксируемого параметра. Основным параметром, как правило, считается ударная волна.

Ниже представлены наиболее часто используемые методы фиксации ударной волны в сводной таблице 1.2 [63-66].

Таблица 1.1 - Сравнение характеристик приборов

Характеристика	Наименование прибора				
	Извещатель пламени пожарный инфракрасный ИП 330/3-20 АО «Спецпожинжиниринг»	Извещатель пламени пожарный инфракрасный ИП 330/1-20 АО «Спецпожинжиниринг»	Извещатель пожарный пламени «СПАРК» ИП 329/330-20 комбинированного УФ/ИК диапазона	Извещатель пламени пожарный унифицированный ультрафиолетовый/инфракрасный (УФ/ИК) ИП 329/330-20 АО «Спецпожинжиниринг»	Извещатель пожарный КБ Прибор Пульсар 1-011ПН (ИП 330-111П)
1	2	3	4	5	6
Напряжение питания	от 18 до 32 В постоянного тока (номинальное – 24 В);	от 18 до 30 В постоянного тока (номинальное – 24 В);	от 18 до 30 В постоянного тока (номинальное – 24 В)	от 18 до 30 В постоянного тока (номинальное – 24 В)	28 В
Потребляемая мощность:	номинальная – 4,0 Вт, максимальная в режиме «пожар» – 5,2 Вт	номинальная – 2,1 Вт, максимальная в режиме «пожар» – 3,5 Вт	номинальная – 2,8 Вт, максимальная в режиме «пожар» – 4,8 Вт	номинальная – 2,8 Вт, максимальная в режиме «пожар» – 4,8 Вт	-
Диапазон спектральной чувствительности	-	от 4,2 до 4,7 мкм	УФ – от 0,185 до 0,245 мкм, ИК – от 4,2 до 4,7 мкм	УФ – от 0,185 до 0,245 мкм, ИК – от 4,2 до 4,7 мкм	0,8 - 1,1 мкм
Угол обзора детектора	90°	90°	90°	90°	120°
Температурный диапазон эксплуатации: стандартная модель модель с видеокамерой высокотемпературная модель	-60...+75 °С -20...+70 °С; -	-60...+75 °С -20...+70 °С; -60...+125 °С	-60...+75 °С -60...+125 °С	-60...+75 °С -20...+70 °С; -60...+125 °С	-10...+55 °С
Маркировка взрывозащиты:	1ExdIICT6/T5/T4 X	1ExdIICT6/T5/T4 X	1ExdIICT6/T5/T4 X	1ExdIICT6/T5/T4 X	1ExdIICT6/T5/T4 X
Степень защиты оболочкой	IP66	IP66	IP66	IP66	IP55
Дальность обнаружения очагов пожара, м, не менее: - для очага пожара ТП-5 - для очага пожара ТП-6	60 30	60 30	60 30	60 30	15 30
Гарантийный срок, лет	10	10	10	10	10
Время срабатывания	10-15 с	10-15 с	10-15 с	10-15 с	6-12 с



Окончание таблицы 1.1

Характеристика	Наименование прибора						
	Извещатель ИП 330-1-4 Вега извещатель пламени пожарный взрывозащищенный	Извещатель ИПП - 07е Гелиосминус 2 ИК Извещатель пламени пожарный взрывозащищенный	Извещатель пламени МДП (ИП 330-8)	Извещатель пожарный пламени Спектронминус 201 (ИП 330-3-3)	Извещатель ИП 330-5 исп. 1 Ясень	Модуляционный датчик инфракрасного излучения (RU2003109905A)	Датчик-извещатель инфракрасного излучения
1	7	8	9	10	11	12	13
Напряжение питания	9 – 32 В	8-28 В	24 В ±2 В	9 – 28 В	18 – 27 В	9-18 В	9-18 В
Потребляемая мощность:	- в дежурном режиме 2 - в режиме тревоги 3 - в режиме обогрева 6	-	-	-	-	-	-
Диапазон спектральной чувствительности	ИК-диапазон	ИК-диапазон 0,9...4,7 мкм	ИК -диапазон 2,4 до 5,0 мкм	ИК-диапазон 0,8...1,1 мкм	ИК -диапазон 2...4.3 мкм	ИК-диапазон 0,2...4,7 мкм	ИК-диапазон 0,2...4,7 мкм
Угол обзора детектора	90 ± 2	50°, 70°	90°	120°	85°	+0°	90°
Температурный диапазон эксплуатации: стандартная модель модель с видеокамерой высокотемпературная модель	-60 °С...+85 °С	-60 °С ...+55 °С	-30 °С ... +50 °С	-50 °С ... +55 °С	-35 °С...+45 °С	-40 °С ...+55 °С	-60 °С ...+55 °С
Маркировка взрывозащиты:	1ExdIICT5 X	1Exd IICT6Gb X	1ExdIICT4	-	1ExdIICT6 X	1Exd IICT6Gb X	1Exd IICT6Gb X
Степень защиты оболочкой	IP67	IP66, IP67	IP 68	IP41, IP 68	IP 68	IP67	IP68
Дальность обнаружения очагов пожара, м, не менее: - для очага пожара ТП-5 - для очага пожара ТП-6	60 30	25 17	17 15	30 12	25 25	60 60	60 60
Гарантийный срок, лет	10	5	10	10	10	10	10
Время срабатывания	10 с	3 с	0,2-0,5 с	7-22 с	30 с	3 с	3 с

Таблица 1.2 - Методы фиксации ударной волны

Место описания метода	Принцип регистрации	Заключение
1	2	3
Патент на изобретение № 2168158	<p>1. Пьезорезистивный датчик, обладающий способностью при ударе с металлической пластиной возбуждать в среде ударную волну, помещается в диэлектрическую среду;</p> <p>2. Регистрируется напряжение на датчике;</p> <p>3. По датчику фиксируют момент прихода к нему фронта ударной волны и давление;</p> <p>4. Еще до прихода ударной волны к датчику, регистрируют электродвижущую силу электромагнитной индукции. Электромагнитная индукция обусловлена изменением магнитного поля датчика, которое происходит в момент совпадения фронта падающей и (или) отраженной волны и обращенной поверхности пластины к датчику.</p>	При перемещении ударной волны возможна регистрация давления
Патент № 218.016.А 50С	<p>1. В местах горных выработок размещается устройство «черный ящик». Это устройство: способно регистрировать параметры аварийного взрыва метанопылевоздушной смеси; сохранять необходимую информацию в памяти своего устройства.</p> <p>Отличия данного метода от предыдущего:</p> <p>1. «Черные ящики» устанавливаются на всем протяжении горных выработок по пути предполагаемого распространения фронта взрывной волны и огня;</p> <p>2. Размещается только в заданных точках «пикетах»;</p> <p>3. Имеет простую конструкцию, незначительные габариты;</p> <p>4. Не нуждается в дополнительных источниках электропитания;</p> <p>5. Надежно, достоверно и избирательно фиксирует основные физические характеристики: либо начинающихся только развиваться, либо затухающих по пути горных выработок аварийных взрывов (температура во фронте пламени и давление во фронте взрывной волны);</p> <p>6. Регистрируют начало развития и затухания взрыва:</p> <p>7. Сохраняют и защищают полученную информацию до того момента, когда их обнаружат, поднимут на поверхность, расшифруют полученные данные;</p> <p>8. Полученная полная информация дает возможность проанализировать процесс развития или затухания взрывов;</p> <p>9. Понять причины произошедшей аварии.</p>	Возможность регистрировать и сохранять в своей памяти параметры взрыва метанопылевоздушной смеси в горных выработках.

Окончание таблицы 1.2

1	2	3
Патент № 2265198	<p>1. По пути распространения взрывной волны в местах исследований устанавливается датчик;</p> <p>2. С датчика регистрируется электросигнал;</p> <p>3. По датчику определяется давление, время прихода к нему взрывной падающей волны и момент времени, связанным с возникновением отражения волн.</p> <p>Отличия третьего метода от двух предыдущих:</p> <p>1. Измерения производятся в конденсированной среде, состоящей из двух образцов. В зазоре между образцами располагается датчик. Ширина зазора должна быть обязательно больше, чем ширина самого датчика, а также за датчиком необходимо образование слоя газообразного вещества;</p> <p>2. Определяется давление в отраженных волнах, которые возникают при схлопывании зазора и столкновении стенок зазора самого датчика;</p> <p>3. Моменты времени, связанные с возникновением отраженных волн определяют по времени, когда эти волны приходят к датчику.</p>	Способность измерять параметры ударной волны.
Патент SU № 934792	<p>1. По пути распространения взрывной волны в исследуемой среде последовательно располагаются датчики емкостной и резистивный.</p> <p>2. Если возник скачек напряжения в общей схеме включения датчиков, то это показывает величину давления на всем фронте взрывной волны;</p> <p>3. Время между скачком и импульсом напряжения емкостного датчика показывает скорость фронта взрывной волны.</p>	Измерять датчиками давление и скорость фронта взрывной волны.

Существующие методы фиксации параметров взрыва по параметру ударной волны основываются на расположении оборудования непосредственно в месте взрыва. Также вышеуказанные способы являются технически сложными и практически нереализуемыми на функционирующем производственном объекте.

Предлагаемый в работе новый метод позволяет фиксировать параметры взрыва на значительном расстоянии от его источника (до 100 метров).

В таблице 1.3 представлен сравнительный анализ методов контроля по параметру ударной волны и новый метод фиксации по тепловому потоку.

Таблица 1.3 – Анализ методов контроля

Методы	Определяемые характеристики			Необходимость специального оборудования, реагентов, помещений
	Скорость реакции	Тепловой поток	Температура	
Способ измерения параметров ударной волны А.Г. Иванов, В.А. Огородников (Патент RU №2168158)	+		-	+
Способ регистрации и сохранения параметров взрыва метанопылевоздушной смеси в горных выработках и устройство «черный ящик» для его осуществления (Патент RU №2537308)	+	-	-	+
Способ измерения параметров УВ с помощью одного пьезорезистивного датчика Л.А. Гатилов (Патент RU №2265198)	+	+	-	+
Метод измерения теплового потока датчиком-извещателем инфракрасного излучения (Патент на полезную модель прибора RU 195452 U1, 28.01.2020)	+	+	+	+
Способ измерения параметров ударной волны (Патент SU №934792)	-	-	+	+

Как видно из таблицы 1.3 описанные способы имеют ряд отличительных характеристик, а также свои недостатки.

#### 1.4 Выводы по главе

1. Проанализированы известные аварийные ситуации на газопроводах при отрицательных температурах окружающей среды. По результатам анализа получены выводы об основных причинах повреждений газопровода при минусовых режимах работы. Установлено, что пожар возникает в 66 % случаях, если прорыв магистрального газопровода произошел при низких температурах окружающего воздуха.

2. Проведен анализ существующих методов контроля параметров теплового потока при взрыве газозвушной смеси. Установлено, что вышеуказанные методы являются технически сложными и практически нереализуемыми на функционирующем производственном объекте.

3. Проведен анализ существующих приборов контроля параметров теплового потока при взрыве газозвушной смеси. Выполнен сравнительный анализ характеристик существующих приборов измерения на примере наиболее распространённых извещателей на объектах нефтегазового комплекса. Их среднее время срабатывания составляет порядка 10-12 с, что является недостаточным для возможности снятия физических показаний при взрыве газозвушной смеси.

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

### 2.1 Разработка метода контроля теплового потока при взрыве газозвоздушной смеси

По результатам анализа и систематизации существующих методов, а также приборной базы было принято решение о создании принципиально нового метода для возможности реализации получения экспериментальных данных посредством применения разработанного датчика контроля теплового потока.

Как видно из статистики аварийных ситуаций [46] особый интерес представляет поведение взрыва ГВС при отрицательных температурах окружающего воздуха.

На первом этапе работы был проведен анализ физических показателей газов, необходимых для исследования.

Согласно работам [67-70] при исследовании кинетики процессов горения и ингибирования газозфазных пламен для различных режимов протекания была установлена зависимость химической реакции от температуры, где разветвление цепей преобладает над их обрывом. Этот кинетический процесс описывается двойной экспонентой. На ней отслеживается, что скорость реакции находится в зависимости от температуры и значительно отличается от аррениусовской. Определить значение показателя можно по формуле (2.1).

$$W/[B]_0 = k_p n_0 \left\{ \exp \int_{t_0}^t [f_0 \exp(-E_p/RT) - g] dt \right\}, \quad (2.1)$$

где  $[B]_0$  – начальная концентрация исходного реагента;

$k_p$  – константа равновесия реакции;

$n_o$  – концентрация носителей реакционных цепей в момент времени  $t_o$ , после которого можно пренебречь реакцией исходных молекулярных компонентов между собой;

$f_o$  – предэкспоненциальный множитель удельной скорости;

$E_p$  – энергия активации разветвления цепей;

$R$  – газовая постоянная;

$g$  – ускорение свободного падения.

Далее проведем сравнение физических свойств водорода, природного и бытового газов (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Корреляция свойств водорода, природного и бытового газов

Критерий сравнения	Водород	Бытовой газ	Природный газ/метан
Химический состав	$H_2$	этан ( $C_2H_6$ ), пропан ( $C_3H_8$ ), бутан ( $C_4H_{10}$ ). водород ( $H_2$ ), сероводород ( $H_2S$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ), азот ( $N_2$ ), гелий (He).	Метан ( $CH_4$ )
Физические свойства (при н.у.):	0,08987 кг/м <sup>3</sup>	От 0,68 до 0,85 кг/м <sup>3</sup> (сухой газообразный); кг/м <sup>3</sup> (жидкий).	0,7168 кг/м <sup>3</sup>
1. Плотность			
2. Температура самовозгорания	510 °C	650 °C;	545 °C;
3. Взрывоопасные концентрации смеси газа с воздухом	4,1 —74,2 % объемных	от 5 % до 15 % объемных	От 5,3 до 15 % объемных
4. Удельная теплота сгорания	10,83 МДж / м <sup>3</sup> (2,588 Мкал/м <sup>3</sup> ), (т.е. 3,008 кВт-ч/м <sup>3</sup> );	28—46 МДж/м <sup>3</sup> (6,7—11,0 Мкал/м <sup>3</sup> ), (т.е. 8-12 кВт-ч/м <sup>3</sup> );	35,76 МДж/м <sup>3</sup> (8,547 Мкал/м <sup>3</sup> ), (т.е. 9,93 кВт-ч/м <sup>3</sup> )

Давление и температура значительно влияют на плотность газов. Существуют две единицы измерения плотности: абсолютные (г/см<sup>3</sup>, кг/м<sup>3</sup>) и относительные. Плотность газов приблизительно в 1000 раз меньше плотности жидкости при давлении 0,1 МПа и температуре 0 °C. Для углеводородных газов, в

зависимости от содержания в них легких и тяжелых углеводородов, плотность их изменяется в пределах от 0,0007 до 0,0015 г/см<sup>3</sup>.

Отношение плотности газа при атмосферном давлении 0,1 МПа и температуре окружающего воздуха, как правило, 0°С к плотности воздуха при тех же параметрах температуры и давления, называется относительной плотностью. Относительная плотность по воздуху для углеводородных газов имеет пределы изменения 0,6-1,1.

Для газа, являющегося энергоносителем, его показатели находятся в зависимости от содержащегося в нем метана. Газовая смесь, содержащая в своем составе этан и несколько процентов других не углеродных газов, становится очень ценным химическим сырьем.

Следовательно, в качестве газа для разработанного метода принято решение использовать природный газ.

Характеристики компонентов природного газа приведены в таблице 2.2.

Для сравнения характеристик из таблицы 2.2 принимаем пределы воспламеняемости в смеси с воздухом: нижний — 1,5 %, верхний — 9,5 %, что также подтверждают исследования [71].

Следующим этапом - разработка принципиальной блок-схемы нового метода получения экспериментальных данных (рисунок 2.1).

Особенность данного метода заключается в возможности посредством фиксирующего оборудования в зависимости от начальных параметров температуры и концентрации получить значение теплового потока при взрыве ГВС при разных показателях окружающего воздуха.

После выбора газа и разработки блок-схемы метода необходимо выбрать фиксирующее оборудование для проведения эксперимента.



Таблица 2.2 – Характеристики компонентов природного газа

Наименование	Диоксид углерода	Азот (сжатый газ)	Изобутан	Метан	Этан	Пропан	Н-Пентан
Химическая формула	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> / (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> / CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> - CH <sub>3</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> / CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>
Молекулярная масса	44,0	28,01	58,1	16,0	30,1	44,1	72,2
Температура кипения	минус 79 °С	минус 196 °С	минус 12 °С	минус 161°С	минус 89 °С	минус 42 °С	плюс 36 °С
Температура плавления	минус 56,6 при 5,2 атм. °С	минус 210 °С	минус 160 °С	минус 183 °С	минус 183 °С	минус 189 °С	минус 129 °С
Относительная плотность (вода = 1)	-	-	-	-	-	-	0,63
Растворимость в воде, мл/100 мл при 20 °С	88	слабая	нерастворимо	3,3	4,7	6,5	нерастворимо
Давление паров, кПа при 20 °С	5720	-	304	-	3850	-	при 18,5 °С: 53,3
Относительная плотность пара (воздух = 1)	1,5	0,97	2	0,6	1,05	1,6	2,5
Температура вспышки	-	-	Горючий газ	Горючий газ	Горючий газ	Горючий газ	минус 49 °С
Температура самовоспламенения	-	-	460 °С	537 °С	472 °С	450 °С	309 °С
Пределы взрываемости, объем % в воздухе	-	-	1,8-8,4	5-15	3,0-12,5	2,1-9,5	1,5-7,8
Коэффициент распределения октанол/вода как lg P <sub>ow</sub>	-	-	2,8	1,09	1,81	-	3,39

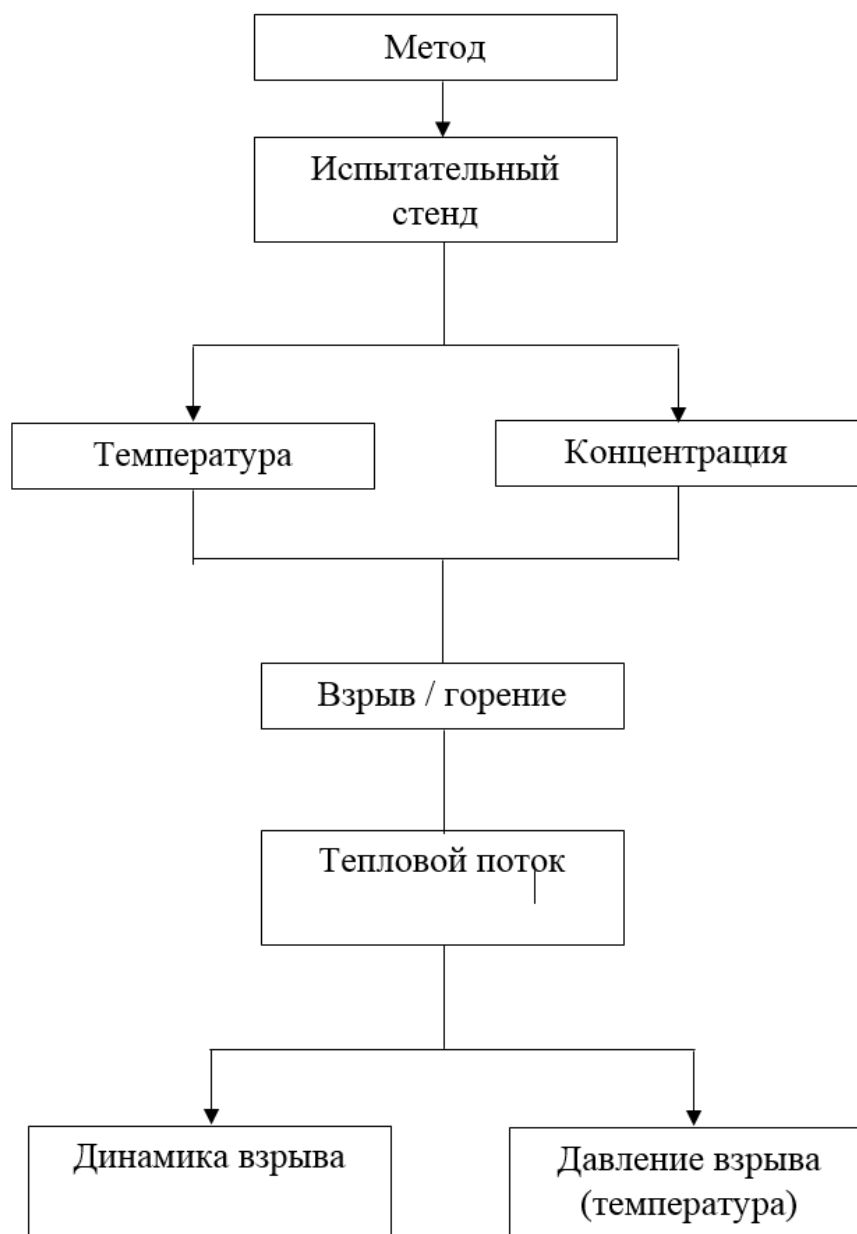


Рисунок 2.1 – Метод контроля теплового потока при взрыве ГВС

Основными контролируемыми параметрами в разработанной методике приняты:

1. Концентрация

Для контроля концентрации смеси в качестве фиксирующего оборудование предложено использовать счетчик газа диафрагменный с температурной компенсацией ВК-G1,6Т [72] (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Технические характеристики прибора

Технические характеристики	Ед. изм.	ВК-G1,6 ВК-G1,6T
Расход	м <sup>3</sup> /ч	
- максимальный		2,3
- номинальный		1,6
- минимальный		0,016
Порог чувствительности	м <sup>3</sup> /ч	0,0032
Максимальное рабочее давление	кПа	50
Потери давления	Па	<200
Максимальное допустимое давление внутри корпуса	кПа	100
Пределы допускаемой относительной погрешности в диапазоне расходов: $Q_{\min} < Q < 0,1 Q_{\text{ном}}$ $0,1 Q_{\text{ном}} < Q < Q_{\text{max}}$	%	$\pm 3 \pm 1.5$
Емкость счетного механизма	м <sup>3</sup>	99999/ 9999
Цена деления младшего разряда	л	0,2
Параметры датчика импульсов:		
напряжение:	В	12
ток:	мА	10
цена одного импульса	имп/м <sup>3</sup>	0,01
Температура рабочей среды	°С	минус 25... плюс 10
Температура окружающей среды	°С	минус 40...плюс 55

Счетчик состоит из корпуса со встроенным измерительным механизмом, состоящим из двух камер с мембранами, и прикрепленного к корпусу отсчетного устройства. Кривошипно-шатунный механизм преобразует поступательное движение мембран во вращательное, которое через магнитную муфту передается отсчетному устройству.

К основным преимуществам данного счетчика можно отнести:

- низкий порог чувствительности (0,0032 м<sup>3</sup>/ч);
- наличие механического температурного компенсатора, который обеспечивает приведение значений объема, измеренного счетчиком, к температуре плюс 20 °С в диапазоне рабочих температур;
- устройство, препятствующее обратному ходу счетного механизма;
- дистанционную передачу информации с помощью подключаемого датчика импульсов типа IN-Z61 («геркон») и системного решения автоматического считывания (AMR).

Снимаемые величины посредством счетчика: объем кислорода и газа в м<sup>3</sup>.

## 2. Температура

Для контроля температуры окружающей среды при проведении исследований в качестве фиксирующего оборудование применяется одноканальный прибор для измерения температуры (Testo 925 - 1-канальный термометр) [73].

Модель внесена в государственный реестр средств измерений РФ.

Термометр предлагается использовать за счет его основных преимуществ:

- диапазона измерения температуры от минус 50 °С до плюс 1000 °С;
- погрешности измерений, которая составляет  $\pm(0,5 \text{ °С} + 0,3 \text{ \% от изм. знач.})$  (минус 40 °С ... плюс 900 °С).

Размерность снимаемой характеристики °С.

## 3. Мощность взрыва (тепловой поток Вт/м<sup>2</sup>)

Для снятия показаний мощности теплового потока (взрыва) в качестве фиксирующего оборудование был использован датчик контроля теплового потока (далее ДКТП) [46] (Патент на полезную модель прибора RU 195452 U1, 28.01.2020), т.к. для органических материалов характерной чертой горения (а также тления, нагрева) является интенсивное излучение углекислого газа на длине волны от 2,7 мкм до 4,3 мкм [74-76]. Характеристики прибора и его принцип действия приведены в главе 2.2 настоящей работы.

Размерность снимаемой характеристики Вт/м<sup>2</sup>.

## 4. Скорость реакции

Для регистрации процессов протекания эксперимента (взрыва) в качестве фиксирующего оборудования предложено использовать 8-мегапиксельную скоростную поворотная IP-видеокамеру DC-S3883HRX [77].

Устройство имеет встроенный обогреватель и может работать при температуре от минус 50 °С до плюс 60 °С.

Размерность: кадр/с.

### 2.1.1 Концепция и компоновка испытательного стенда

Для получения экспериментальных данных посредством фиксирующего оборудования, предложенного в методе, была разработана принципиальная схема испытательного стенда (рисунок 2.2).

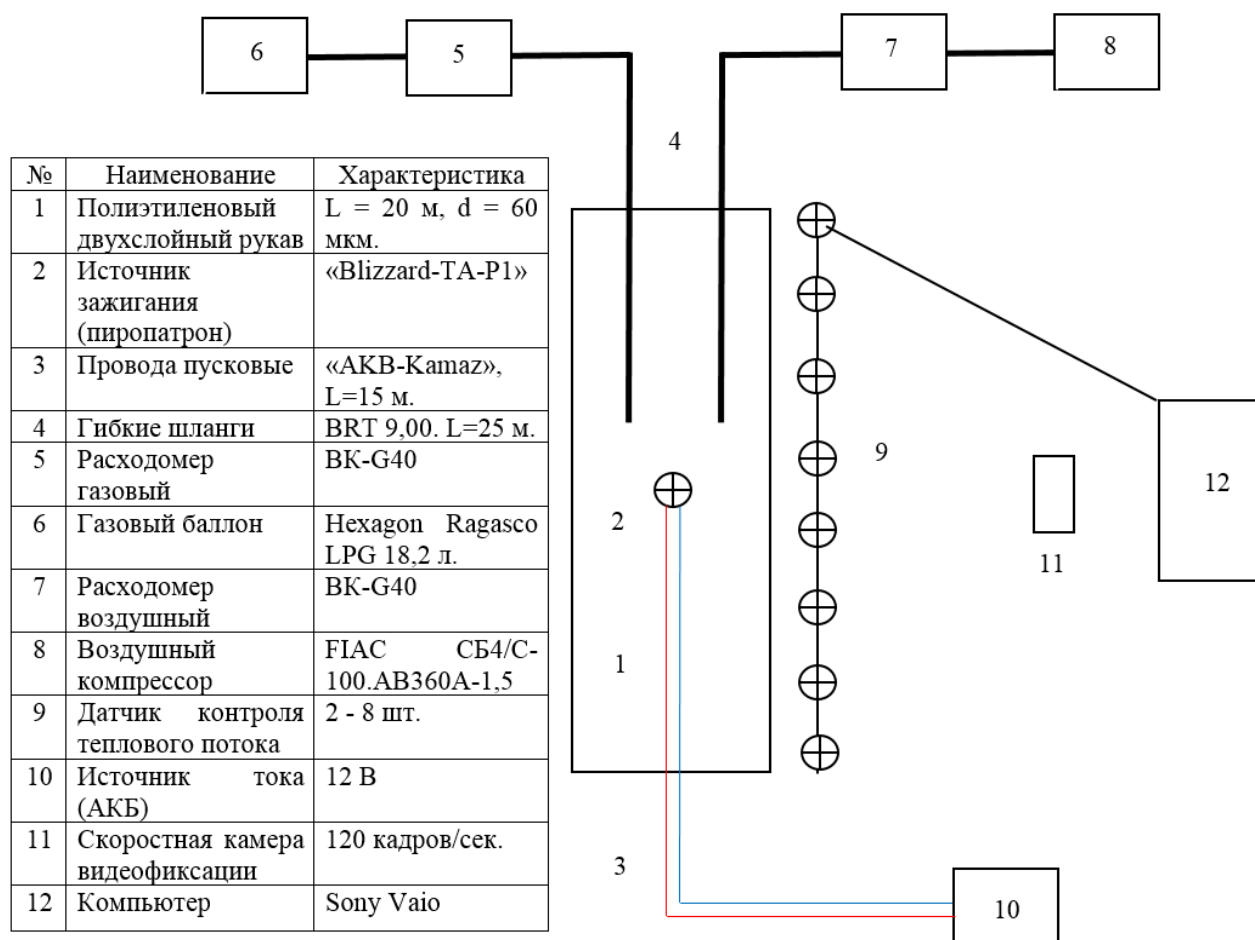


Рисунок 2.2 – Принципиальная блок-схема испытательного стенда

В основу эксперимента принят двадцатиметровый полиэтиленовый двухслойный рукав (выполненный в форме трубы) с запаянными торцами. Диаметр устройства принят равным 1 м, толщина стенки 1 мм.

Атмосферный воздух при помощи компрессора (по типу РК 24.F185/1.1 [78]) через газовые шланги и газовый расходомер диафрагменный с температурной компенсацией ВК-G1,6Т [72] поступает в полиэтиленовый рукав (трубу) с одного

из торцов до появления натяжения стенок.

Параллельно с подачей атмосферного воздуха через соседний шланг осуществляется подача метана для организации 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 (автомобильная лампа накаливания со снятым стеклянным баллоном, и не потревоженной нитью накаливания). Далее рукавная линия герметизируется.

Дальнейшая работа установки происходит по двум вариантам:

1. Осуществляется выдержка заполненной рукавной линии в течение 600 сек, с подачей тока на источник зажигания (автомобильную лампу накаливания) от аккумуляторной батареи 12В.

2. Производится детонация без выдержки.

Температурный диапазон проведения эксперимента установлен в границах от минус 42 °С до плюс 30 °С.

### 2.1.2 Расчет концентрации и объема газовой смеси

Объем рукава является постоянной величиной и составляет 15,7 м<sup>3</sup>. Для экспериментальной установки принято решение проведения реакции взрыва с шагом 1,5 % объема газа. Величины газа и воздуха представлены в сводной таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Численная величина концентрации ГВС

Порядковый номер	Концентрация газа		Концентрация кислорода	
	%	м <sup>3</sup>	%	м <sup>3</sup>
1	2	0,31	98	15,39
2	3,5	0,55	96,5	15,15
3	5	0,79	95	14,92
4	6,5	1,02	93,5	14,68
5	8	1,26	92	14,44
6	9,5	1,49	90,5	14,21

### 2.1.3. Выбор температурных условий проведения эксперимента

Местом проведения эксперимента выбрана область в пределах г. Красноярска, удаленная от него на расстояние 100 км. Город Красноярск находится в южной части Красноярского края и расположен в зоне умеренного резко континентального климата [79]. В черте города под влиянием незамерзающей зимой реки Енисей и Красноярского водохранилища климатика смягчается.

Континентальность климата обуславливает значительные перепады суточных температур воздуха, достигающих в летнее время значения 15-20 градусов между ночными и дневными температурами. Абсолютный месячный минимум в ноябре на 0,7 °С ниже, чем в феврале (минус 42,3 °С и минус 41,6 °С соответственно), а абсолютный максимум в апреле на 0,1 °С выше, чем в сентябре (плюс 31,4 °С и плюс 31,3 °С соответственно).

По данным многолетних наблюдений средняя температура в городе Красноярске составляет минус 6,5 °С. Самым тёплым месяцем является июль со средним показателем плюс 15,7 °С. Самый холодный месяц – январь, его средние значения достигают минус 28,7 °С. За весь период наблюдений в Красноярске регистрировалась самая высокая температура плюс 41°С (21 июля 2015 года), а самая низкая минус 52,8 °С (8 января 1931 года) [79].

За текущее десятилетие низкие экстремальные температуры были зафиксированы в 2001 году: минус 43,4°С (8 января 2001 года). В тоже время в Красноярске был зарегистрирован абсолютный минимум февраля (минус 41,6°С) и мая (минус 11,2 °С).

В результате анализа метеоданных с сайта [gr5.ru](http://gr5.ru) [79] выбраны следующие условия проведения эксперимента:

- для измерения развития взрыва интервал температурных показаний принят от плюс 30 °С до минус 42 °С (по возможности ниже);
- шаг эксперимента составляет 10 °С для каждого блока испытаний;

- отсутствие осадков, минимальный ветер (или штиль);
- время проведения эксперимента – дневное, в связи с техническими особенностями фиксирующей видеоаппаратуры.

#### **2.1.4 Особые условия проведения эксперимента**

Местом проведения эксперимента выбран полигон Главного управления МЧС России по Красноярскому краю. Полигон является специализированной площадкой для проведения ряда экспериментов и отработки учений личного состава части на случай ЧС. Территория удалена от селитебной зоны городских построек на расстоянии 15 км, оснащена средствами быстрого реагирования для тушения пожара.

### **2.2 Разработка прибора контроля и фиксации взрыва газовой смеси**

#### **2.2.1 Патент на полезную модель**

На датчик контроля теплового потока получен патент на полезную модель RU 195452 U1, 28.01.2020 [46].

Полезная модель на изделие относится к устройствам пожарной сигнализации для обнаружения очага возгорания по параметру теплового потока.

Известен широкообзорный датчик излучения, состоящий из корпуса, электронных блоков, фотоэлемента, собирающей линзы, и использующийся для обнаружения очага возгорания по ИК излучению источника повышенной температуры (Патент РФ № 45544 U1, дата публикации: 2005.05.10, Амельчугов



сП. [80]).

К недостаткам известного аналога можно отнести:

Во-первых, ограниченную область применения – эксплуатационный показатели датчика не предназначены для работы в условиях экстремально низких температур, характерных для полярных и приполярных широт.

Во-вторых, недостаточное быстродействие датчика необходимое для фиксации первой стадии взрыва обусловленное отсутствием центрального процессора обработки информации.

Наиболее близким к предлагаемой полезной модели является датчик - извещатель инфракрасного излучения. Устройство состоит из корпуса, аналоговой части с усилителем сигнала, цифровой части с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), фоточувствительного элемента со светофильтром, пропускающим инфракрасное излучение, микроконтроллером с памятью и приемопередатчиком последовательного порта. А также, выход логического блока этого датчика через блок памяти соединен с цифроаналоговым преобразователем (ЦАП). Выход ЦАП присоединен ко входу усилителя аналоговой части. Многоканальные входы АЦП позволяют соединяться с дополнительными датчиками (Патент РФ № 2289850 С2, дата публикации: 20.12.2006 г., Шайдуров Г.Я. и др., RU) [81].

Недостатками прототипа являются:

Во-первых, ограниченная область применения, обусловленная невозможностью использования датчика в условиях экстремально низких температур, характерных для полярных и приполярных широт.

Во-вторых, низкий уровень точности в определении места очага пожара обусловленный ограниченным количеством связей (не более 31) с дополнительными датчиками.

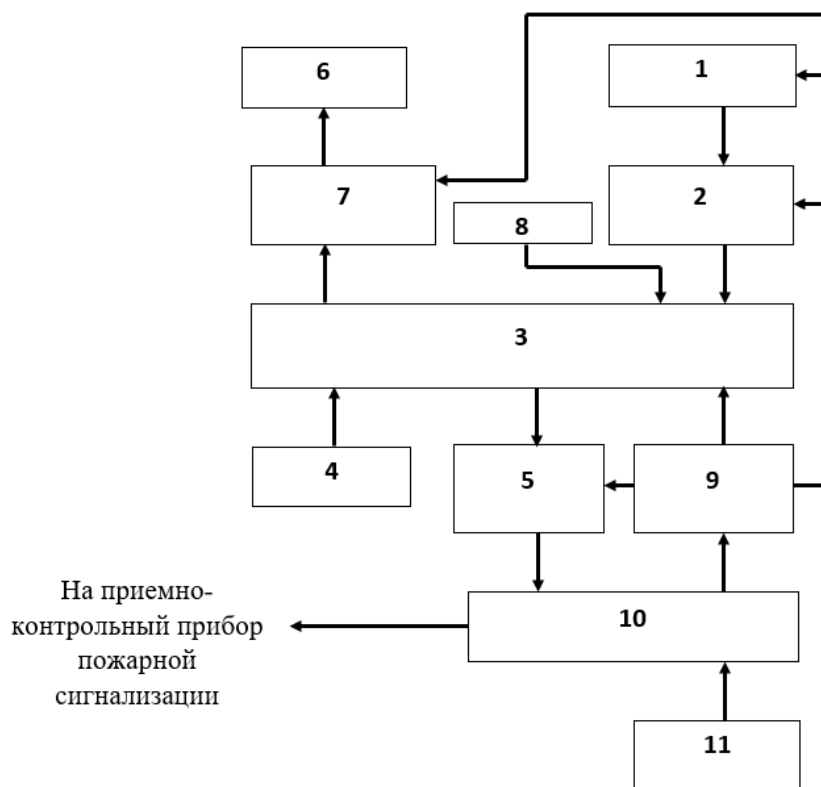
В-третьих, недостаточное быстродействие датчика необходимое для фиксации первой стадии взрыва обусловленное применением низкопроизводительного процессора (микроконтроллера) для обработки информации.

Технической проблемой полезной модели является возможность использования устройств пожарной сигнализации в условиях экстремально низких температур за счет применения внутри корпуса резистора подогрева внутреннего пространства корпуса, а также возможность точного определения места очага пожара или взрыва, за счет использования высокопроизводительного процессора универсального назначения, например - ARM 32-bit Cortex™-M3, и увеличения связей с дополнительными датчиками на линии (до 127).

Для решения технической проблемы предлагается использовать датчик контроля теплового потока [42], состоящий из корпуса, включающего в себя фотогальванический полупроводниковый приемник излучения (1), операционные усилители (2,7), высокопроизводительный процессор универсального назначения, ARM 32-bit Cortex™-M3 (3), кварцевый резонатор (4), микросхему интерфейса RS-485 (5), резистор подогрева (6), термодатчик (8), стабилизатор питания (9), клеммную колодку (10), источник питания (11).

На рисунке 2.3, где показана функциональная схема датчика контроля теплового потока.

Принцип работы представлен 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).



1 – фотогоальванический 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.

Рисунок 2.3 – Функциональная схема датчика контроля теплового потока.

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 минус 2048 до 2047) и посредством микросхемы интерфейса (5) передается на приемно-контрольный прибор пожарной сигнализации (далее ПКП ПС) пакетом данных размером в 12 байт. Таким образом, при использовании высокопроизводительного процессора универсального назначения, максимально возможное количество обращений в секунду к ПКП ПС при скорости 375 кбит/с и

длине линии до 500 метров 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 прибора. 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).

Технический результат предлагаемой полезной модели заключается в улучшенных характеристиках устройства пожарной сигнализации (время срабатывания - не превышает 0,1 с, скорость обнаружение пламенной зоны составляет 0,025 с, температурный диапазон эксплуатации находится в пределах от -70 до + 65°C, а дальность обнаружения очага взрыва составляет не менее 100 м), что позволит повысить техногенную безопасность производственных объектов, функционирующих при отрицательных температурах окружающего воздуха.

При этом технико-экономическая эффективность предлагаемого устройства обусловлена:

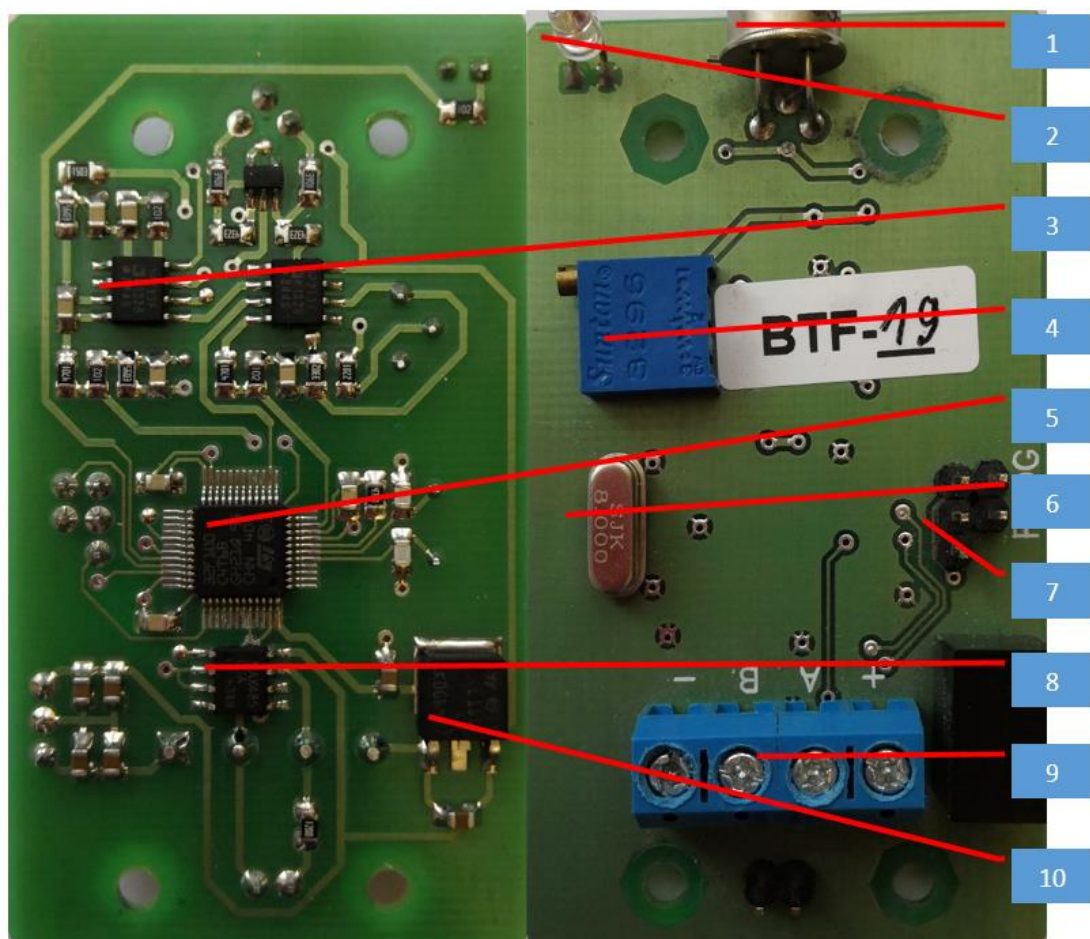
- снижением потерь от возникающих пожаров и взрывов за счет точного и быстрого определения очага и стадии их развития;
- уменьшением затрат на монтаж пожарной сигнализации за счет увеличенного количества связей с дополнительными датчиками на линии;
- оптимизацией затрат на обогрев защищаемого помещения, необходимый для нормального функционирования устройств пожарной сигнализации.

Датчик – это автоматическое оптико-электронное устройство, которое дает возможность фиксировать тепловой поток в ИК диапазоне от излучения углекислого газа. Влияние световых помех, возникающих от искусственных и естественных источников освещения на фотоприемник незначительно.

Устройство постоянно регистрирует тепловой поток ИК-излучения, электронная схема обрабатывает (фильтрует и усиливает сигнал), а затем измеряет

его и на контрольно-адресный модуль по адресному запросу выдает информацию в цифровом виде (интерфейс RS-485). Светодиодный индикатор в смотровом окне своим миганием дает сигнал о том, что происходит опрос датчика управляющим устройством.

Прибор (рисунок 2.4) является единой конструкцией, которая включает в себя корпус 1 и единственную двухстороннюю плату 2, выполненную по SMD технологии с габаритами 45 x 95 мм Вес печатной платы составляет не более 0,1 кг.

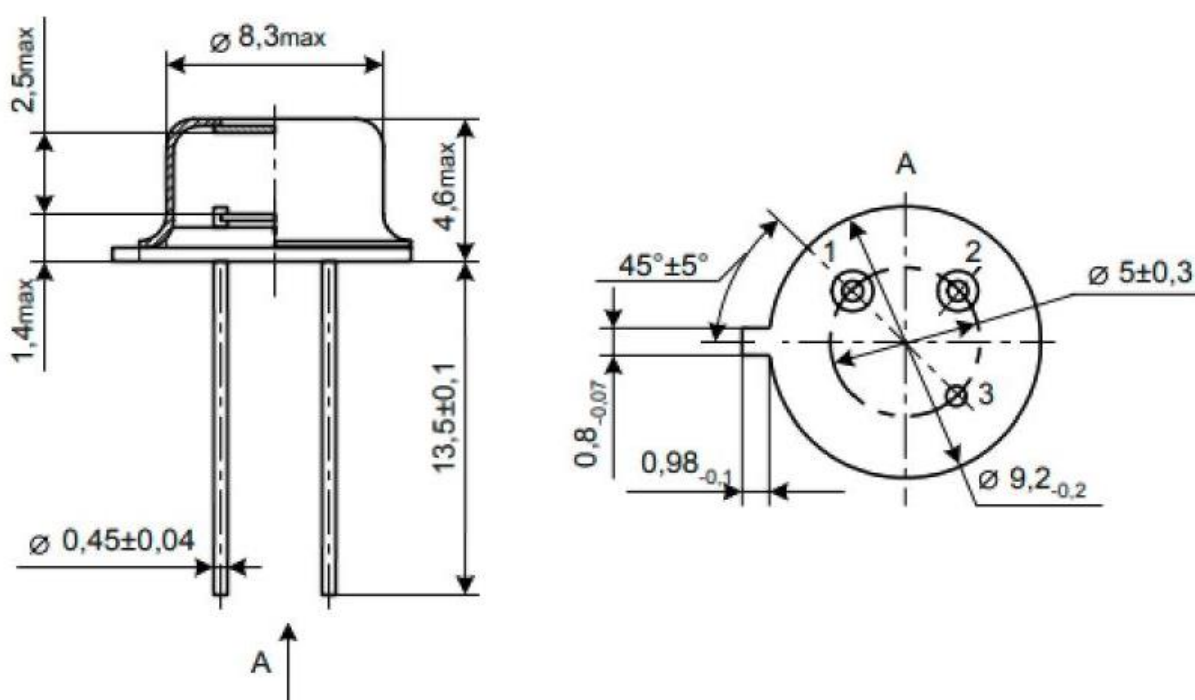


- 1 – чувствительный элемент датчика на базе ФЭ 723-2; 2 – светодиод;  
 3 – операционный усилитель на базе ОР 213F; 4 – подстроечный резистор;  
 5 – процессор на базе ARM 32-bit Cortex™-M3; 6 – кварцевый резонатор;  
 7 – колодка для программирования адреса и режима работы; 8 – микросхема для работы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

Рисунок 2.4 – Плата датчика вид с лицевой и тыльной сторон

### 2.2.2 Принцип работы устройства и его характеристики

В основу прибора положен фотогальванический полупроводниковый приемник излучения ФЭ723-2, характеристики которого представлены на рисунке 2.5.



1 – «-» элемента фоточувствительного; 2 – «+» элемента фоточувствительного;  
3 – корпус

Рисунок 2.5 – Геометрические параметры и расположение выводов  
(фотоэлементы ФЭ722, ФЭ723, ФЭ724)

Физические параметры приемника приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Физические параметры приемника

Тип фотоэлемента и вариант конструкции	ФЭ722		ФЭ723		ФЭ724	
	ФЭ722-1	ФЭ 722-2	ФЭ723-1	ФЭ723-2	ФЭ724-1	ФЭ724-2
Эффективная площадь	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0

фоточувствительного элемента, мм						
-------------------------------------	--	--	--	--	--	--

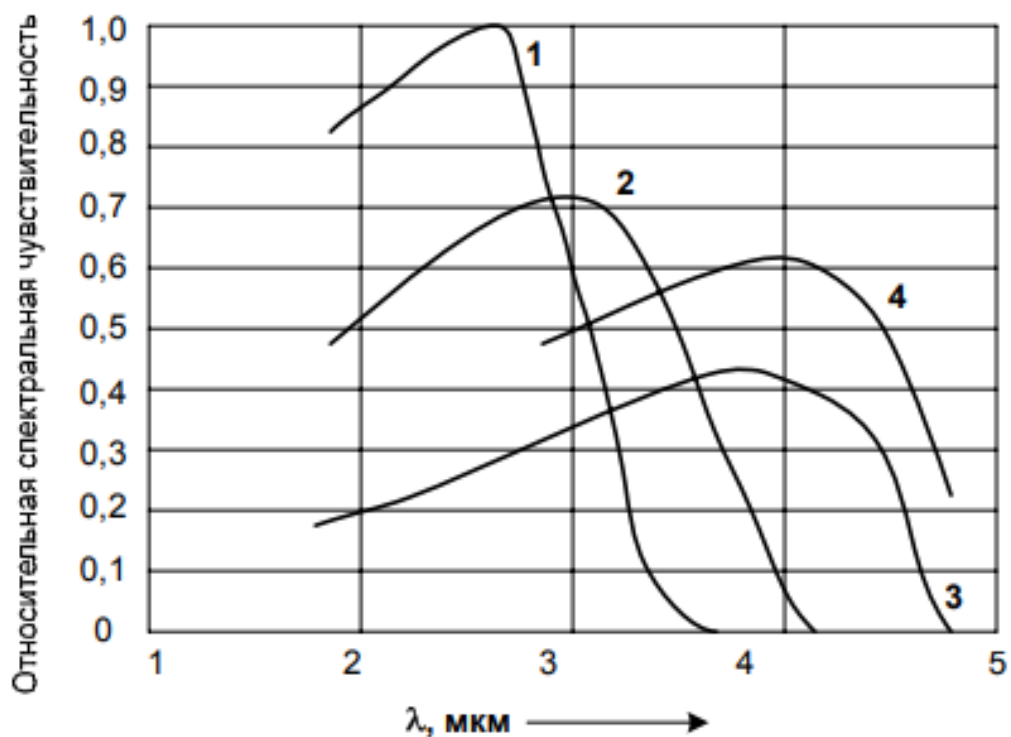
## Окончание таблицы 2.5

Тип фотоэлемента и вариант конструкции	ФЭ722		ФЭ723		ФЭ724	
	ФЭ722-1	ФЭ 722-2	ФЭ723-1	ФЭ723-2	ФЭ724-1	ФЭ724-2
Собственная постоянная времени по нарастанию и спаду сигнала, $t$ , мкс, не более	30		15		5	
Длина волны максимума спектральной чувствительности, $\lambda_{\max}$ , мкм	2,6±0,2		3,2±0,2		3,7±0,2	
Коротковолновая граница спектральной чувствительности, $\lambda'$ , мкм	1,0±0,2		1,0±0,2		1,0±0,2	
Длинноволновая граница спектральной чувствительности, $\lambda''$ , мкм	3,5±0,2		4,2±Д2		4,7±0,2	
Масса, г	1,4					
Интервал рабочих температур, °С	минус 45 ... плюс 65					

Характеристики фильтра полосы пропускания приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Характеристики фильтра полосы пропускания

Обозначение фильтра	Тип фильтра	$\lambda_{\max}$ мкм ±0,02	$\lambda_{0,5}$ мкм	$\lambda_{0,1}$ мкм	FW <sub>HM</sub> HM ±20	FW <sub>01M</sub> HM ±30
1	полосовой	2,98	2,95 ... 3,03		70	120
2	полосовой	3,07	3,01 ... 3,14		140	220
3	полосовой	3,23	3,18 ... 3,23		100	160
4	полосовой	2,278	3,194...3,327		90	150
5	полосовой	3,29	3,18 ... 3,4		220	350
6	полосовой	3,32	3,25 ... 3,38		200	320
7	полосовой	3,4	3,25 ... 3,54		280	450
8	полосовой	3,58	3,51 ... 3,65		140	230
9	полосовой	3,9	3,82 ... 3,96		140	230
10	полосовой	4,31	4,21 ... 4,41		200	320
11	отрезающий			1,6		
12	отрезающий			2,6		
13	отрезающий			0,8		



1 – ФЭ722  
2 – ФЭ723  
3 – ФЭ724  
4 – ФЭ724-Т

Рисунок 2.6 – Распределение спектральной чувствительности

Сигнал с ФЭ723-2 стабилизируется посредством операционного усилителя ОР 213F. Такой сигнал направляется на аналоговый вход процессора ARM 32-bit Cortex™-M3.

Основные технические характеристики датчика приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Технические характеристики датчика

Характеристика	Величина
Количество возможных адресов для одного направления по RS-485	31
Максимальное удаление датчика от управляющего модуля, до	1200 м
Режим работы	непрерывный
Скорость передачи данных, б/сек	9600, 57600
Ток потребления при минимальном напряжении питания	30 мА
Напряжение питания по постоянному току	9 - 18 В



Диапазон рабочих температур	минус 40° - плюс 55° С
Контролируемая зона телесный угол	не менее 90 град
Мощность потребления датчиком	не более 0,3 Вт
Габаритные размеры датчика	Ø54 x 120 мм
Масса датчика: не более	0,25 кг
Средний срок службы датчика не менее	10 лет

Максимальное расстояние до тестового очага ТП5, ТП6 (0,1 м<sup>2</sup> по ГОСТ Р 53325) [82] при котором датчик регистрирует изменение теплового потока до 60 м.

Уровень чувствительности датчика определяется программным обеспечением управляющего модуля, что позволяет его изменять в широких пределах.

Выходной сигнал датчика формируется в виде трехбайтовой посылки, в которой первый байт – это индивидуальный адрес датчика, второй байт – измеренные данные, третий байт – контрольная сумма.

Максимальная частота опроса зависит от количества опрашиваемых датчиков в одной цепочке.

При подаче на датчик напряжения питания обратной полярности, датчик может выйти из строя. Для этой цели его электрическая схема снабжена специальной защитой.

### 2.2.3 Область применения и метрологические данные

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

Извещатель непрерывно мониторит уровень ИК-излучение в зоне контроля и передает его по запросу контрольно-адресного модуля в цифровом виде.

Прибор может использоваться не только на открытом пространстве, а также эксплуатироваться в помещениях всех классов независимо от условий воздействия влажности и запыленности среды.

Электрическое питание датчика происходит по двухпроводной линии питания.

Корпус изготавливается в исполнении с уровнем защиты оболочки IP67 по ГОСТ 14254-96 [83].

Прибор обеспечивает постоянное автоматическое тестирование работоспособности посредством программно-заданного интервала времени для увеличения надежности обнаружения очага ИК-излучения и снижения эксплуатационных затрат, которые сопровождаются периодической проверкой работоспособности силами обслуживающего персонала.

Датчик контроля теплового потока соответствует требованиям технических условий ТУ 4371-003-83053726-2011 [84].

Время срабатывания (обнаружения пламенной зоны), в соответствии с ГОСТ Р 53325-2012 [82], не превышает 0,1 с

### **2.3 Выводы по главе**

1. Разработан метод контроля теплового потока при взрыве газоздушной смеси, позволяющий проводить исследования при разных температурах окружающей среды, в том числе при температурах ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ . Разработанный метод отличается простотой, высокой точностью измерения и погрешностью  $1\pm 0,5\%$ .

2. Разработан испытательный стенд измерения теплового потока по параметрам концентрации и температуры.

3. 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  $+65^{\circ}\text{C}$ , дальность обнаружения очага взрыва составляет не менее 100 м, что превышает установленные требования и, таким образом, превосходит по этим характеристикам существующие аналоги.

### ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО КОНТРОЛЮ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Основной задачей данной главы является возможность экспериментально измерить значение теплового потока при взрыве посредством применения разработанных метода и прибора в условиях низких температур.

На первом этапе была выполнена калибровка ДКТП.

#### 3.1 Тарировочные поправки для снятия физических величин посредством датчика контроля теплового потока

Задачей данного эксперимента ставится тарировка показаний ДКТП [46] к существующим физическим величинам ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

За основу эксперимента взят принцип компоновки оптической скамьи [85].

Источник излучения имеет следующий вид (рисунок 3.1):

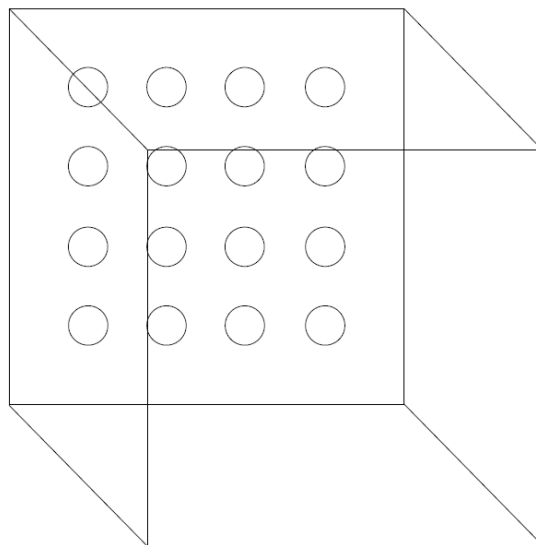


Рисунок 3.1 – Макет источника излучения

Стенд имеет площадь основания равную 1 м<sup>2</sup>. По бокам данной конструкции установлены защитные экраны высотой 0,5 м для исключения возможности рассеивания светового и теплового потоков. На макетной панели расположены 16 источников излучения (лампы накаливания мощностью 40 Вт с рабочим напряжением 220 В). Источники излучения расположены на равноудаленном расстоянии друг от друга для возможности равномерного рассеивания излучения по поверхности стенда.

В направлении к источникам излучения расположена станина в зафиксированном на ней приемным прибором (ДКТП и Люксметром). Станина имеет свободный ход до прибора (датчика) равный 3,0 м.

#### Эксперимент 1.1:

На станине закрепляется Люксметр Testo 545 [86]. Сводные характеристики прибора приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики Люксметра Тесто 545

Характеристика	Значение <a href="http://www.ntcexpert.ru/vic/liuksmetry/635-luksmetr-testo-545">http://www.ntcexpert.ru/vic/liuksmetry/635-luksmetr-testo-545</a>
Диапазон измерений	От 0 до 100 000 Люкс
Рабочая температура	минус 40 ... плюс 50 °С
Температура хранения	минус 50 ... плюс 70 °С

Прибор в плотную на станине располагается вплотную к источнику (расстояние принимает 0,0 м). На макетной панели включаются все источники излучения (лампы накаливания) в количестве 16 шт. Посредством прибора (Люксметра [86]) снимается фактическое показание. Далее прибор с шагом 0,1 м отдаляем от макетной панели до момента достижения крайнего значения, равного 3,0 м. Для снижения возможной погрешности выполняем по 30 повторений эксперимента. Полученные результаты, для визуальной наглядности, усредняем к единому значению по каждой точке. Проведенный анализ данных показал наличие погрешности, не превышающей 2 %. Результаты приведены на графике ниже

(рисунок 3.2).

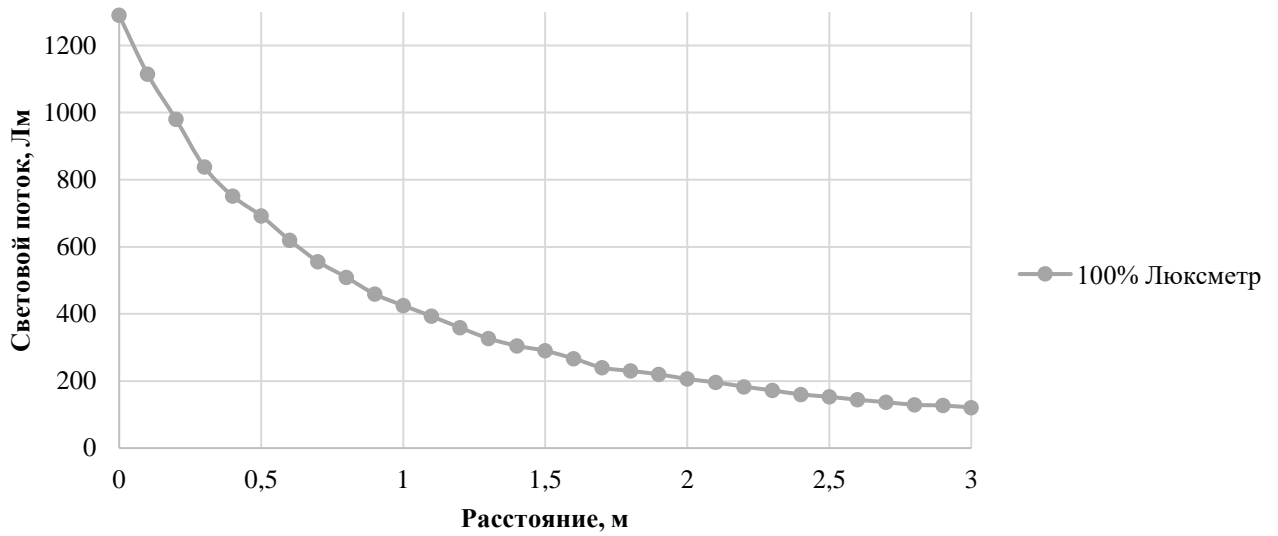


Рисунок 3.2 – Усредненная зависимость значений светового потока в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 100 %)

Эксперимент 1.2:

Эксперимент повторяется, но мощность источника излучения уменьшается в 2 раза (8 ламп накаливания).

Усредненная зависимость для 30 экспериментов приведены на графике ниже (рисунок 3.3.):

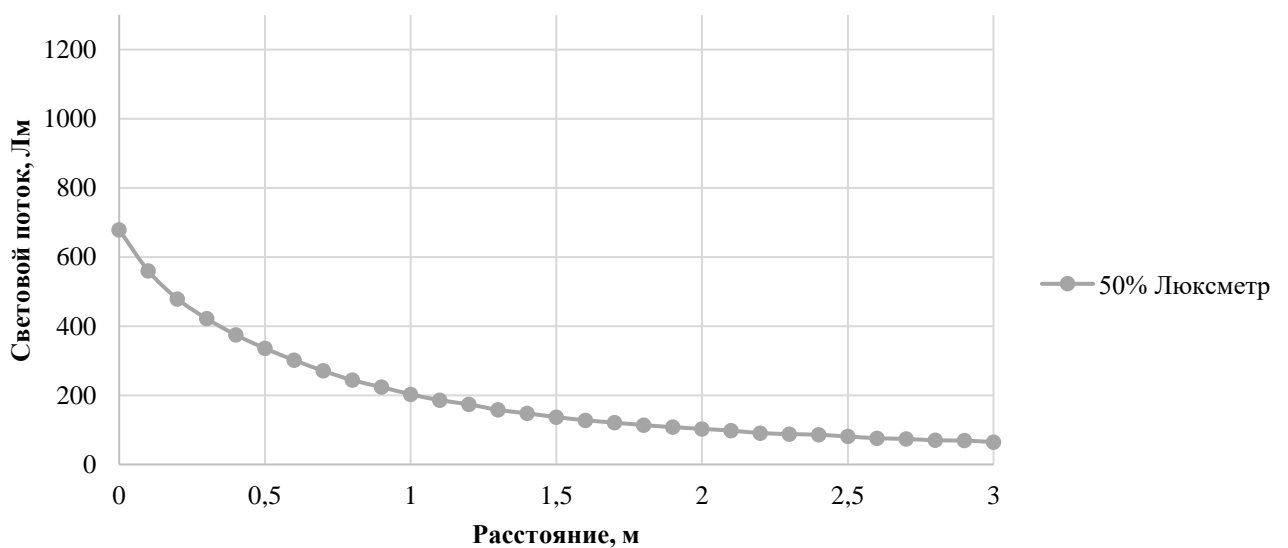


Рисунок 3.3 – Усредненная зависимость значений светового потока в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 50 %)

### Эксперимент 1.3:

Эксперимент повторяется, но мощность источника излучения уменьшается еще 2 раза (4 лампы накаливания).

Усредненная зависимость для 30 экспериментов приведены на графике ниже (рисунок 3.4.):

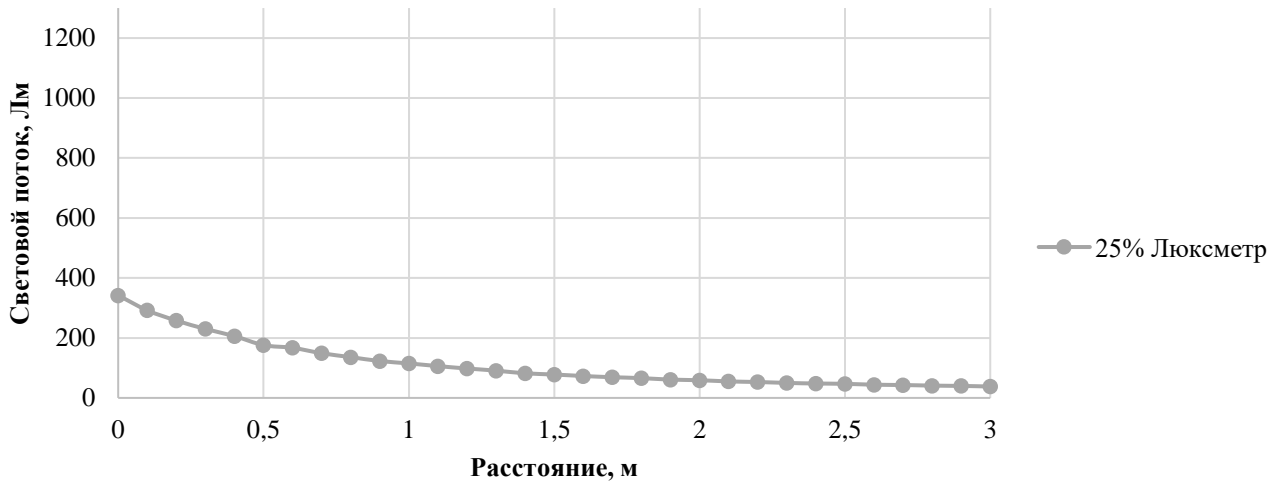


Рисунок 3.4 – Усредненная зависимость значений светового потока в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 50 %)

Зависимости для каждого блока экспериментов сведены в сводный график (рисунок 3.5.):

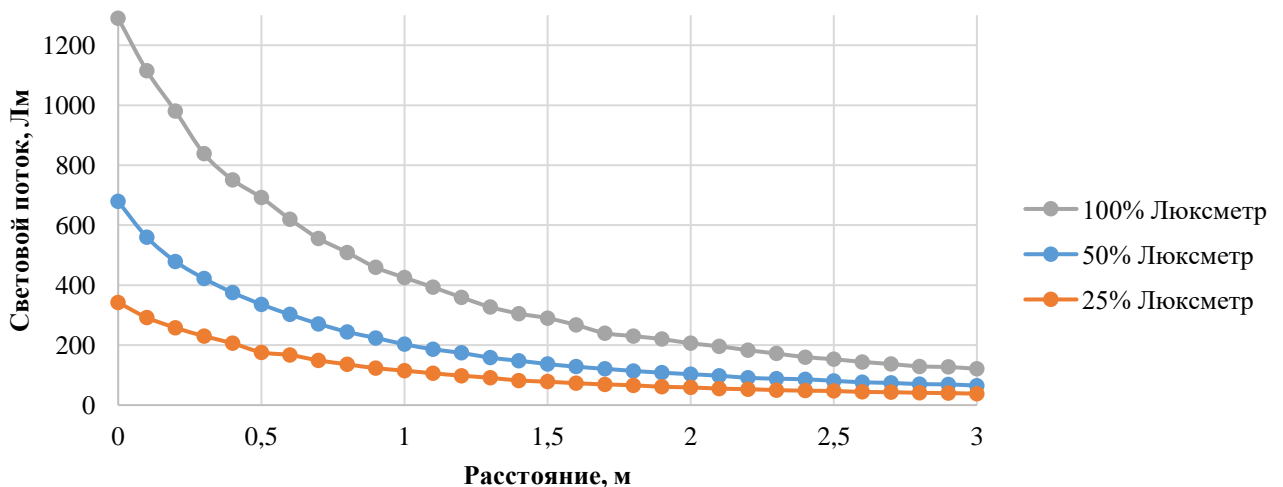


Рисунок 3.5 – Усредненная зависимость значений светового потока в зависимости

от удаления от источника излучения (мощность 100 %, 50 %, 25 %)

Как видно из данного эксперимента наблюдается нелинейная зависимость снижения мощности излучения от количества источников излучения.

Эксперимент 2.1:

Фиксирующий прибор (Люксметр) [86] заменяется на ДКТП и повторяются измерения. В качестве источника излучения вновь выступают 16 ламп накаливания.

Для точности измерения эксперимент повторяется также 30 раз.

Результаты приведены на графике ниже (рисунок 3.6):

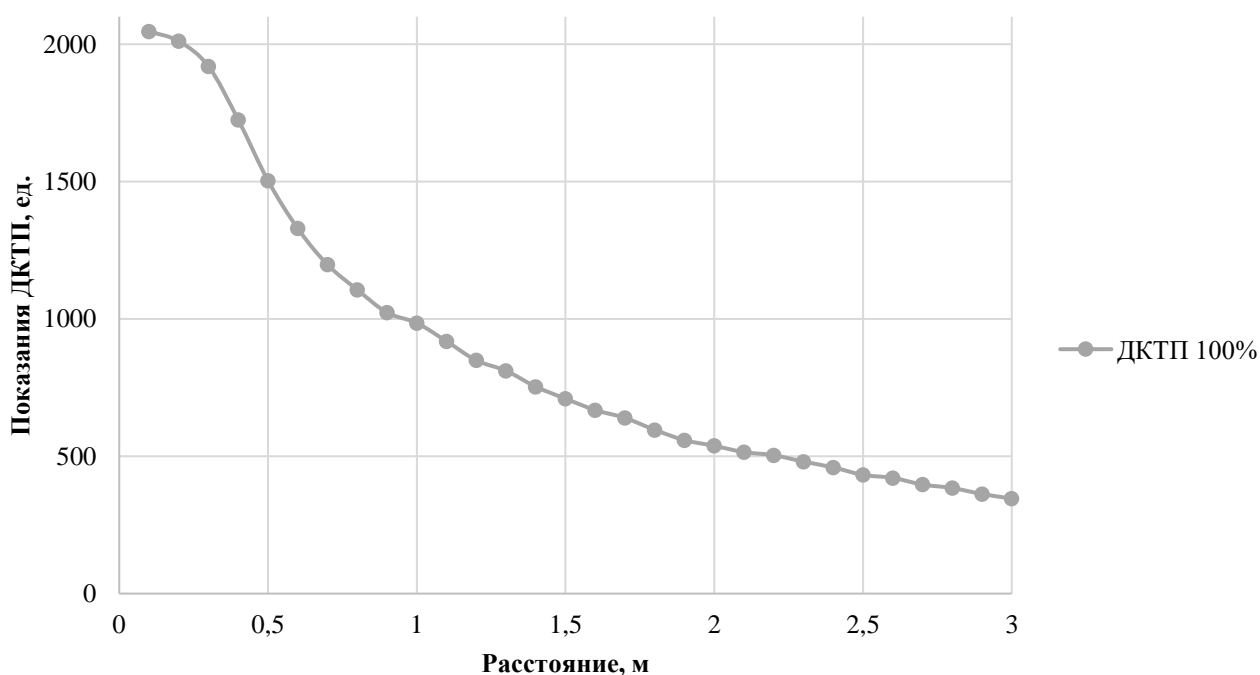


Рисунок 3.6 – Усредненная зависимость показаний ДКТП в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 100 %)

Эксперимент 2.2:

В качестве источника излучения вновь выступают 8 ламп накаливания.

Результаты приведены на графике ниже (рисунок 3.7):

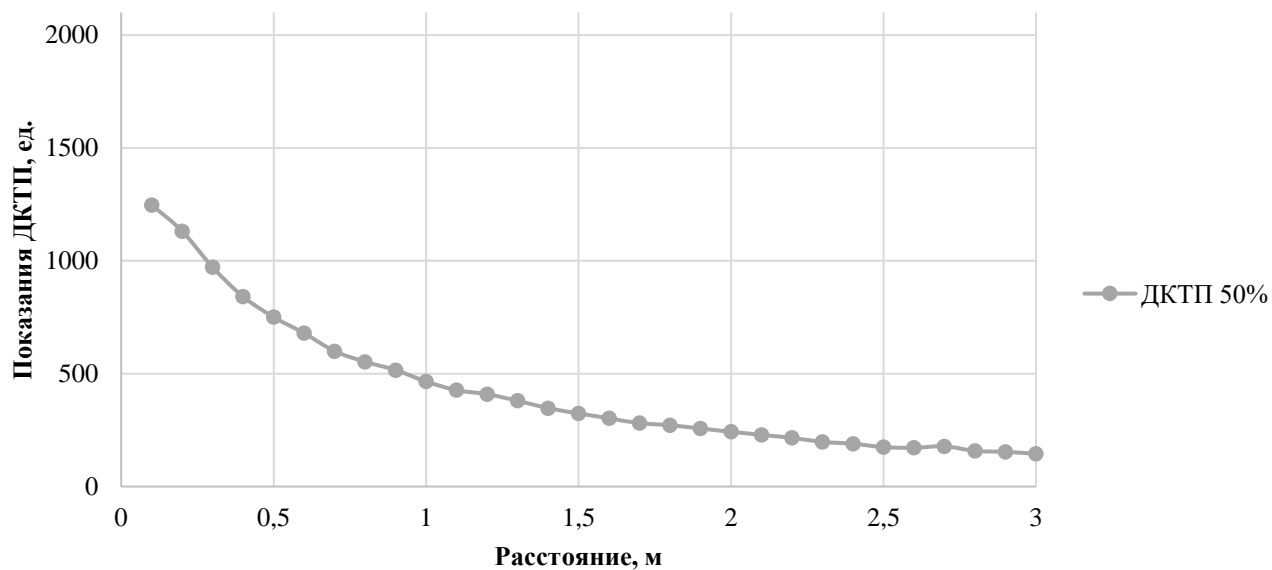


Рисунок 3.7 – Усредненная зависимость показаний ДКТП в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 50 %)

Эксперимент 2.3:

В качестве источника излучения вновь выступают 4 лампы накаливания.

Результаты приведены на графике ниже (рисунок 3.8):

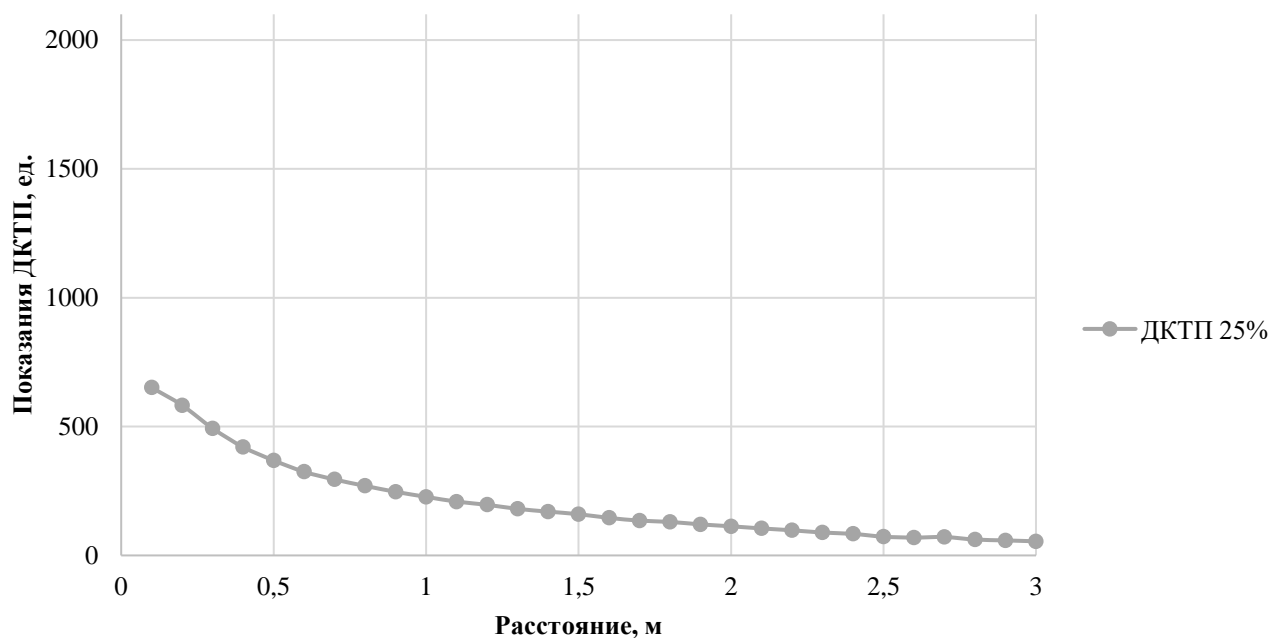


Рисунок 3.8 – Усредненная зависимость показаний ДКТП в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 25 %)



Зависимости для каждого блока экспериментов сведены в сводный график (рисунок 3.9):

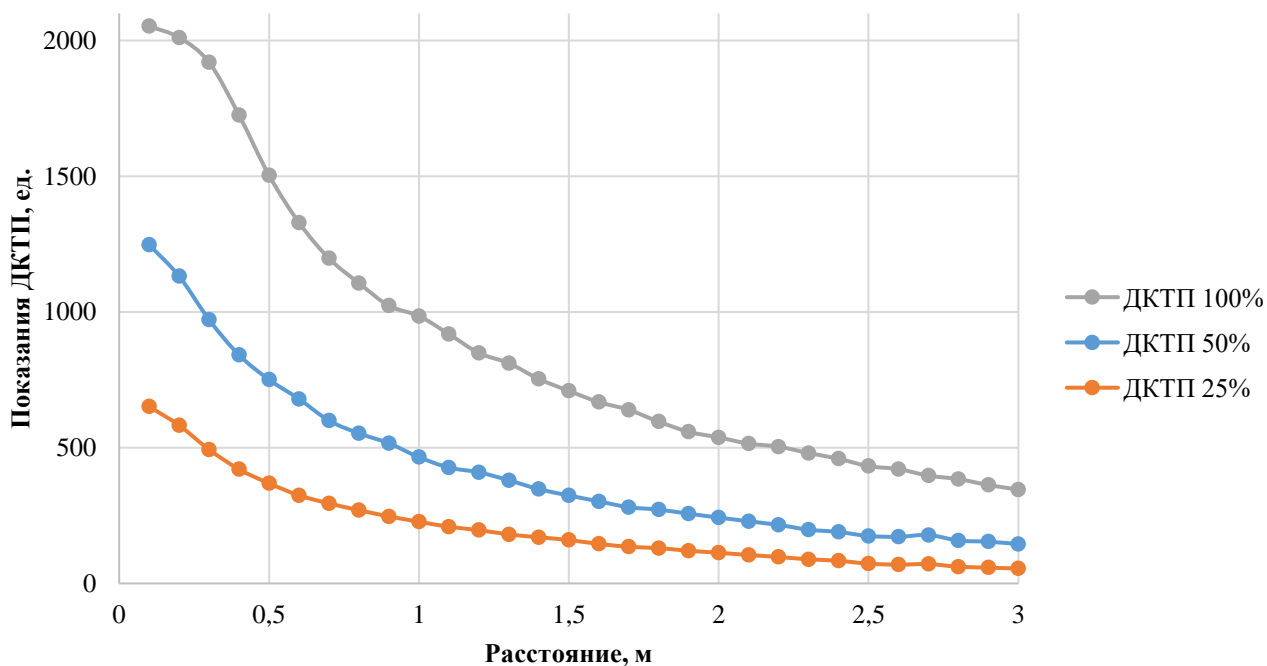


Рисунок 3.9 – Усредненная зависимость показаний ДКТП в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 100 %, 50 %, 25 %)

Анализируя характер полученной зависимости мы можем предположить об обратной экспоненциальной зависимости. Используя тривиальные математические методы (зависимость вида  $y = e^{(ax+b)+c}$ ) мы получаем следующие коэффициенты для трех мощностей (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значение величин от мощности излучения прибора

Наименование величины	Мощность источника		
	100 %	50 %	25 %
a	минус 1,2719	минус 1,2713	минус 1,2722
b	7,6901	7,6915	7,6811
c	296,10	77,68	37,83

Анализируя коэффициенты a и b можно понять, что они практически не зависят от количества ламп накаливания. Значимым эффектом отличается значение коэффициента c.

Ниже представлена зависимость аппроксимации реальных значений полученными кривыми (рисунок 3.10):

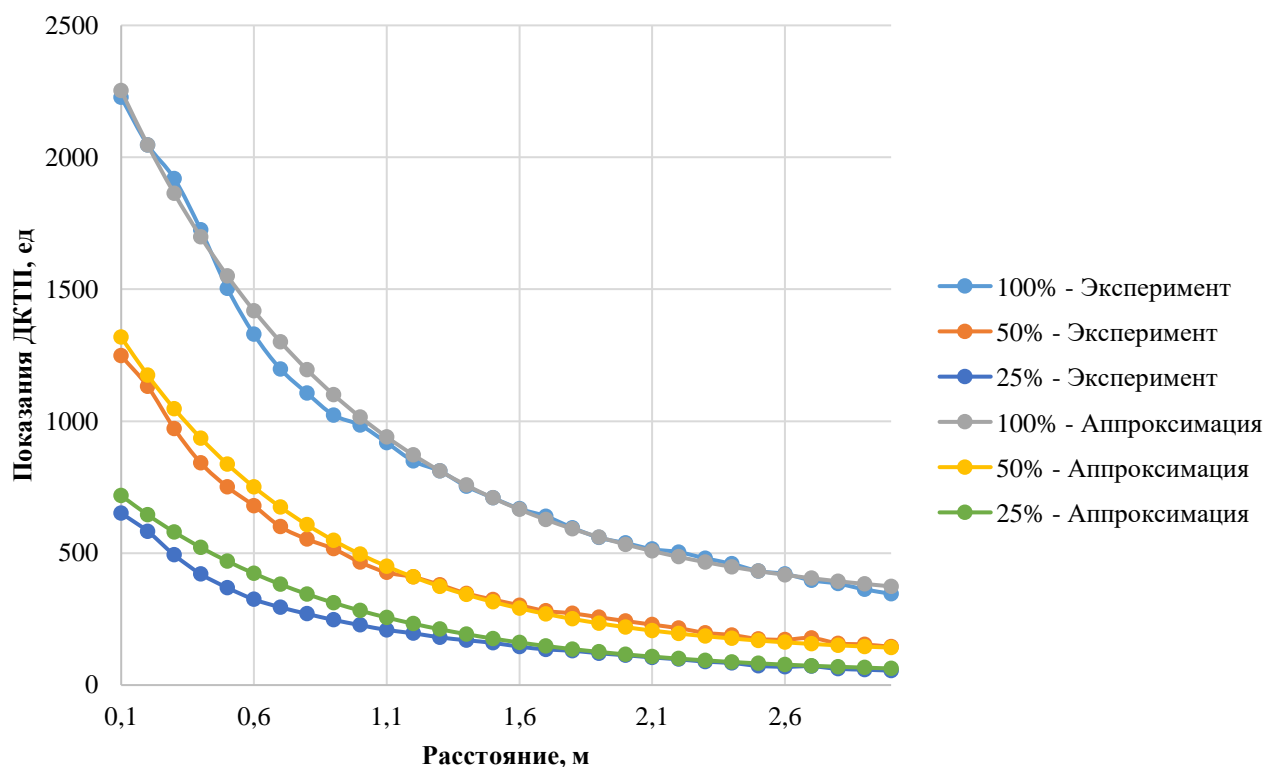


Рисунок 3.10 – Аппроксимация показаний ДКТП в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 100 %, 50 %, 25 %)

Следующим этапом проанализируем величины мощности излучения источников в ИК-диапазоне.

Как известно из [87] лампа накаливания – это электрический источник света. В заполненный инертным газом или в прозрачный завакуумированный сосуд помещается тело накала. За счет протекания через него электрического тока, он нагревается и излучает свет в широком спектральном диапазоне, а также и видимый свет.

Ее спектр считается непрерывным. Из недостатков он имеет максимум на инфракрасном диапазоне, следовательно, большую часть энергии лампа накаливания преобразует в тепловую. При этом коэффициент ее полезного действия невысок, всего около 5 % (остальные 95 % - тепловая энергия), поэтому лампа больше является нагревательным прибором, чем осветительным.

Для определения фактической величины теплового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) также было проведено снятие физических величин с макета источника излучения (рисунок 3.1) посредством тепловизора Thermo Tracer TH9100MR [88]. Сводные характеристики прибора приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики тепловизора Thermo Tracer TH9100MR

Характеристика	Значение <a href="http://www.ntcexpert.ru/vic/ljuksmetry/635-luksmetr-testo-545">http://www.ntcexpert.ru/vic/ljuksmetry/635-luksmetr-testo-545</a>
Диапазон измерения температуры	минус 50°C...плюс 250°C
Чувствительность	Две сотых °C
Погрешность	$\pm 2^\circ\text{C}$ , $\pm 2\%$ от величины показания
Спектр	От 2 до 14 мкм
Диапазон фокусировки	От 30 см до $\infty$
Диапазон рабочих температур и влажность	минус 40 ... плюс 50°C
Температура хранения и влажность	минус 40 ... плюс 70°C
Защита корпуса	IP-54 (пыле- влагозащищенный)

Постановка эксперимента схожа с исследованиями, проведенными для ДКТП и Люксметра.

Макетная панель имеет площадь основания равную  $1 \text{ м}^2$ . По бокам данной конструкции установлены защитные экраны высотой 0,5 м для исключения возможности рассеивания светового и теплового потоков. На макетной панели расположены 16 источников излучения (лампы накаливания мощностью 40 Вт с рабочим напряжением 220 В). Источники излучения расположены на равноудаленном расстоянии друг от друга для возможности равномерного рассеивания излучения по поверхности макета.

В направлении к источникам излучения расположена станина с зафиксированной на ней металлической пластиной. Пластина представляет собой непрозрачную замкнутую полость (известной площади), которая для простоты эксперимента принимается как черное тело. Станина имеет свободный ход для прибора равный 1,2 м. Вдоль нее расположена тарировочная измерительная лента

с шагом 0,15 м.

Далее источником излучения происходит нагрев пластины до установления и производится снятие показаний посредством тепловизора. После источник излучения отключается, и пластина остывает до температуры окружающей среды. Производится смещение пластины от источника излучения на 0,15 м, и опыт повторяется.

Ниже представлена зависимость значений полученной температуры от расстояния смещения пластины (рисунок 3.11).

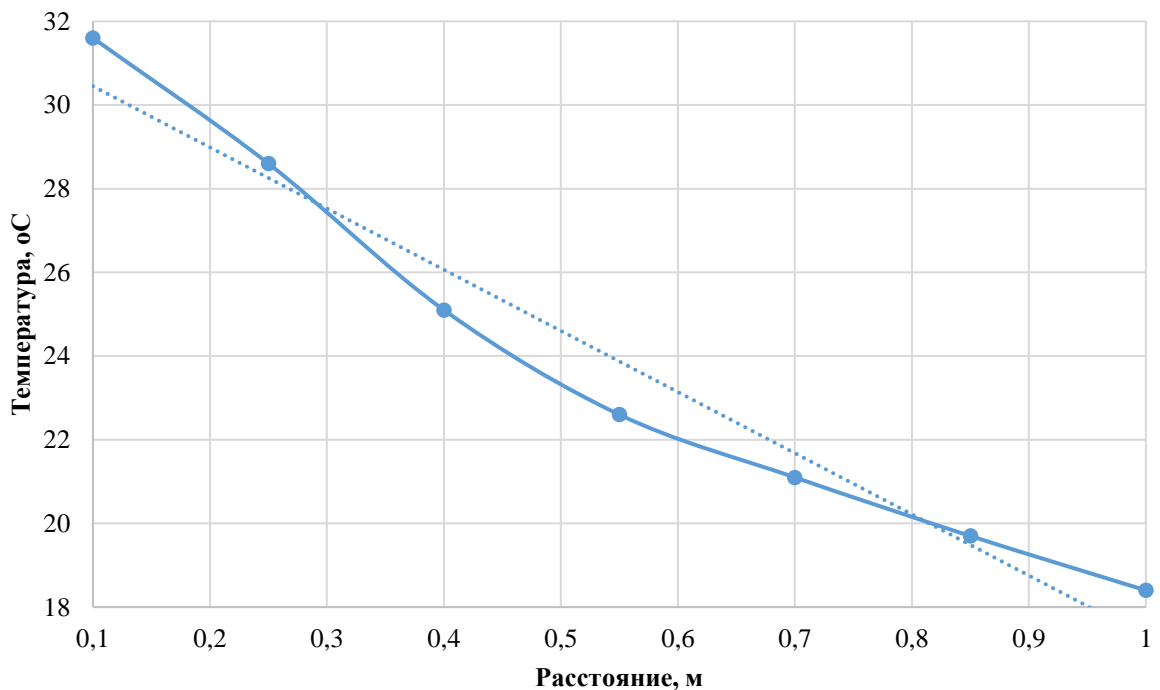


Рисунок 3.11 – Усредненная зависимость показаний тепловизора в зависимости от удаления от источника излучения (мощность 100 %).

Как видно из рисунка 3.11, происходит нелинейное изменение значения температуры в зависимости от удаления от источника излучения.

На основании полученных данных выполним расчет плотности теплового потока от источника излучения.

Поверхность излучения источника можно учитывать как цилиндр с равным диаметром факела  $D_n$ , определяемым по формуле (3.1):

$$D_n = (4 \cdot S_p / \pi)^{0.5}, \quad (3.1)$$

где  $S_p$  - площадь разлива нефтепродуктов, м<sup>2</sup>.

Посредством факельного горения осуществляется теплопередача к окружающим объектам за счет теплового излучения.

Величина плотности теплового излучения  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) на ограниченном расстоянии ( $r$ ) от горения вычисляется по формуле (3.2):

$$q = E \cdot \varphi, \quad (3.2)$$

где  $E$  – средне поверхностная плотность теплового излучения факела пламени кВт/м<sup>2</sup>, значения которой приведены в [37].

$\varphi$  – коэффициент облученности между факелом пламени и элементарной площадкой на поверхности облучаемого объекта.

Величина  $\varphi$  является параметром, который зависит от размеров факела и его взаимного расположения с облучаемой поверхностью [89].

Для оценочного приближения принята формула (3.3) для расчета коэффициента  $\varphi$  [90].

$$\varphi = \frac{r_n^2 \cdot r}{(r_n^2 + r^2)^{1.5}} \cdot [1 - 0.058 \ln(r)], \quad (3.3)$$

где  $r_n$  – радиус факела пламени, определяемый по формуле (3.1), м;

$r$  – расстояние по горизонтали от очага пожара, м.

После тарирования данных, полученных с ДКТП к значениям теплового потока (Вт/м<sup>2</sup>) и определения верхнего и нижнего пределов взрываемости [91], проведем выбор сценариев реализации эксперимента.

### 3.2 Условия взрыва газовой смеси

Каждый эксперимент был из пяти вариантов реализации взрыва, посредством сработки источника зажигания (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Проведение взрыва ГВС

№ варианта реализации взрыва	Концентрационный предел взрываемости (%)	Уточнение
Вариант 1	2,0	Варианты по 3,5 и 5,0 % получили идентичные численные величины, поэтому концентрационный предел взрываемости 5,0 % не учитывается
Вариант 2	3,5	
Вариант 3	6,5	
Вариант 4	8,0	
Вариант 5	9,5	

Полигонные испытания реализовывались с ноября 2011 г. по март 2017 г. Сводные характеристики условий проведения эксперимента представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Сводные характеристики условий проведения эксперимента (по данным [79])

Дата	Температура, °С	Направление и скорость ветра, м/с	Облачность	Давление, ммрт.ст	Явление
1	2	3	4	5	6
07.11.2011	0	СЗ 2м/с	малооблачно	742	Без осадков
	плюс 2	СЗ 2м/с			
	плюс 5	СЗ 1м/с			
	плюс 3	СЗ 2м/с			
	0	СЗ 3м/с			
10.12.2011	минус 20	В 1м/с	пасмурно	753	Снег
	минус 21				
	минус 21				
	минус 24				
	минус 25				
18.02.2012	минус 31	СЗ 1м/с	ясно	762	Без осадков
	минус 30	СЗ 1м/с			
	минус 30	СЗ 2м/с		764	
	минус 31	СЗ 2м/с			
	минус 30	СЗ 2м/с			
	минус 30	СЗ 2м/с			

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
11.05.2012	плюс 8	СЗ 6м/с	малооблачно	748	Без осадков
	плюс 9	СЗ 6м/с			
	плюс 10	СЗ 6м/с			
	плюс 10	СЗ 6м/с			
	плюс 10	СЗ 6м/с			
23.07.2012	плюс 29	СВ 2м/с	облачно	733	Без осадков
	плюс 30	СВ 2м/с			
	плюс 30	СВ 1м/с			
	плюс 31	СВ 1м/с			
18.12.2012	минус 42	Штиль	ясно	758	Без осадков
	минус 42				
	минус 42				
	минус 42				
	минус 42				
21.03.2013	минус 11	В 2м/с	облачно	739	Без осадков
	минус 10	В 2м/с		735	
	минус 10	В 2м/с			
	минус 10	В 1м/с			
	минус 10	В 2м/с			
24.06.2013	плюс 14	З 2м/с	облачно	737	Без осадков
	плюс 15	З 2м/с		736	
	плюс 15	З 2м/с			
	плюс 15	З 1м/с			
	плюс 15	З 2м/с			
06.11.2013	минус 1	С 1м/с	облачно	735	Снег
	0	С 1м/с			
	0	С 1м/с			
	0	С 1м/с			
	0	С 1м/с			
11.04.2014	плюс 14	З 5м/с	облачно	725	Без осадков
	плюс 15	З 3м/с		733	
	плюс 15	З 1м/с			
	плюс 15	З 1м/с			
	плюс 15	З 1м/с			
13.10.2014	0	З 2м/с	пасмурно	738	Без осадков
	0	З 2м/с			
	0	З 2м/с			
	0	З 2м/с			
	0	З 2м/с			
01.12.2014	минус 15	Штиль	пасмурно	747	Без осадков
	минус 15				
	минус 15				
	минус 15				
	минус 15				

## Окончание таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
06.06.2015	плюс 24	Штиль	облачно	734	Без осадков
	плюс 25				
	плюс 25				
	плюс 25				
	плюс 25				
18.12.2016	минус 31	Штиль	ясно	750	Без осадков
	минус 30				
	минус 30				
	минус 30				
	минус 30				
25.03.2017	плюс 10	СВ 1м/с	ясно	738	Без осадков
	плюс 10	СВ 1м/с			
	плюс 10	СВ 1м/с			

Погодные условия подбирались с учетом возможности охвата всего возможного диапазона температурных показаний окружающей среды. Так же в учет, для увеличения точности измерений, принимаются следующие характеристики:

- направление и скорость ветра (м/с) минимальны (штиль);
- отсутствие осадков.

### 3.3 Результаты натуральных испытаний с учетом полученных данных с фиксирующего оборудования

Эксперименты проводились на разработанном стенде, характеристики которого приведены в главе 2.

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

- после заполнения объема рукава ГВС производится выдержка в интервале 600 с для образования однородной смеси и разделения газа на фракции (только при отрицательной температуре);
- после заполнения объема рукава ГВС выдержка не производится



(происходит мгновенная детонация объема);

– в объем рукава устанавливаются преградительные конструкции и после заполнения объема рукава ГВС производится детонация без выдержки.

### 3.3.1 Первый испытательный стенд

После образование облака с присутствующим в нем горючим компонентом в смеси с окислителем (практически всегда с кислородом) в определенном диапазоне концентраций, как правило следует взрыв ГВС. При этом взрывная волна с огромной скоростью, достигающей до тысячи м/с, распространяется в границах облака.

Показатели ударной волны за пределами взрывного облака и динамика горения газовой смеси определяются физико-техническими свойствами ГВС, формой и объемом облака на момент взрыва, а также местом возникновения вспышки (у центра или края облака). Первый эксперимент подтверждается следующими иллюстрациями (рисунки 3.12 – 3.16):



Рисунок 3.12 – Испытательный стенд, заполненный газом и воздухом



Рисунок 3.13 – Срабатывание пиропатрона



Рисунок 3.14 – Разрыв удерживающей лески



Рисунок 3.15 – Горение легких фракций газа



Рисунок 3.16 – Разрыв второй фиксирующей лески

Как видно из полученных фотофиксаций (рисунки 3.12 – 3.16) при выполнении выдержки ГВС происходит ее разделение путем фракционной конденсации [92]. 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 верхней, за счет чего мощность взрыва усиливается.

### 3.3.2 Второй испытательный стенд

Второй эксперимент подтверждается следующими иллюстрациями (рисунки 3.17 – 3.22):



Рисунок 3.17 – Начальная стадия вспышки



Рисунок 3.18 – Распространение горения ГВС



Рисунок 3.19 – Появление избыточного давления горения



Рисунок 3.20 – Разрыв рукавной линии



Рисунок 3.21 – Схлопывание рукавной линии



Рисунок 3.22 – Выход ГВС за пределы рукавной линии

Как видно из рисунков 3.17 – 3.22 без выполнения выдержки ГВС, ее разделение на фракции не происходит. Наблюдается дефлаграционный взрыв [93].

### 3.3.3 Третий испытательный стенд

После первого и второго эксперимента была произведена еще одна процедура, имеющая сходство с предыдущими. Были установлены преградительные стенды, обеспечивающие появление турбулизации. Выдержка не осуществлялась.

Третий эксперимент находит свое подтверждение в иллюстрациях 3.23-3.29.





Рисунок 3.23 – Стенд с установленными преградительными конструкциями



Рисунок 3.24 – Начальная стадия вспышки



Рисунок 3.25 – Появление избыточного давления и разрыв рукавной линии



Рисунок 3.26 – Турбулизация первого сектора



Рисунок 3.27 – Турбулизация второго сектора



Рисунок 3.28 – Турбулизация третьего сектора



Рисунок 3.29 – Выход избыточного давления

При анализе результатов экспериментов с детонацией без выдержки (рисунки 3.12 – 3.16) и (рисунки 3.23 – 3.29) мощность протекания дефлаграционного взрыва, при наличии преградительных конструкций значительно [93] 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 действие взрыва) зданий и строений, поражающая область

значительно увеличится.

Следующим этапом работы было построение зависимостей параметров протекания взрыва, полученных посредством ДТКТ, от времени протекания.

### 3.4 Зависимости мощности взрыва от времени по параметру концентрации

Мощность взрыва по концентрационному пределу ГВС имеет следующий вид (рисунок 3.30 – 3.35).

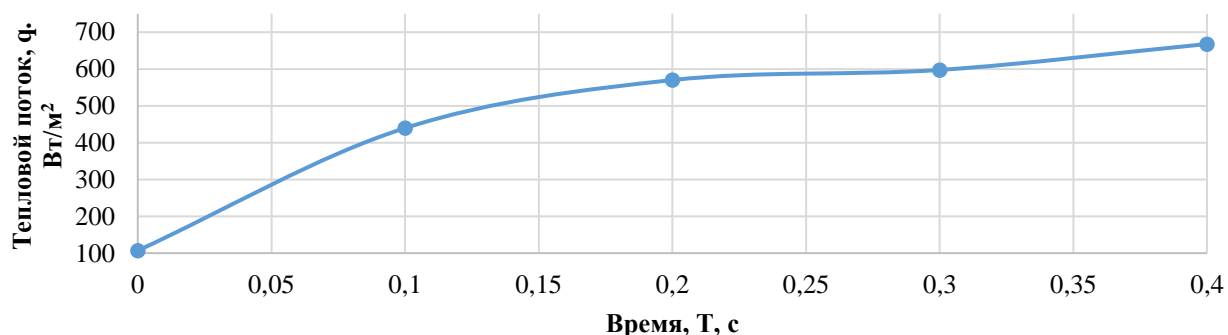


Рисунок 3.30 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при концентрационном пределе газа 2,0 % полученная в результате эксперимента

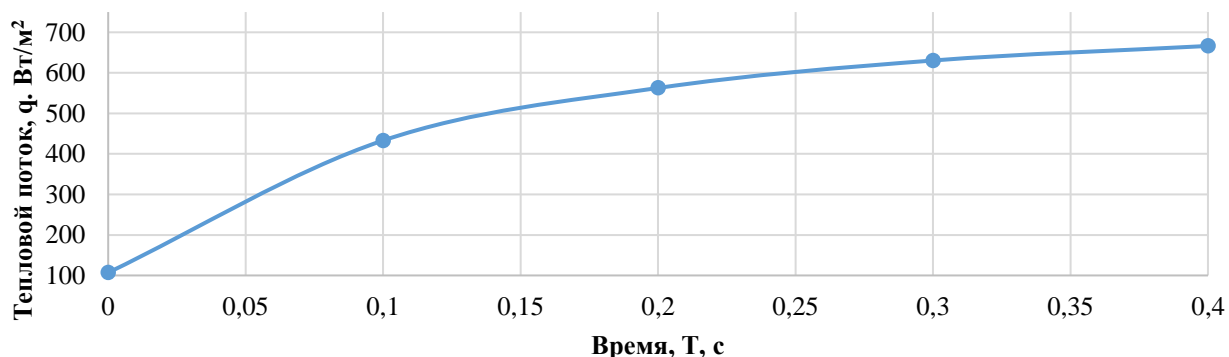


Рисунок 3.31 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при концентрационном пределе газа 3,5 % полученная в результате эксперимента



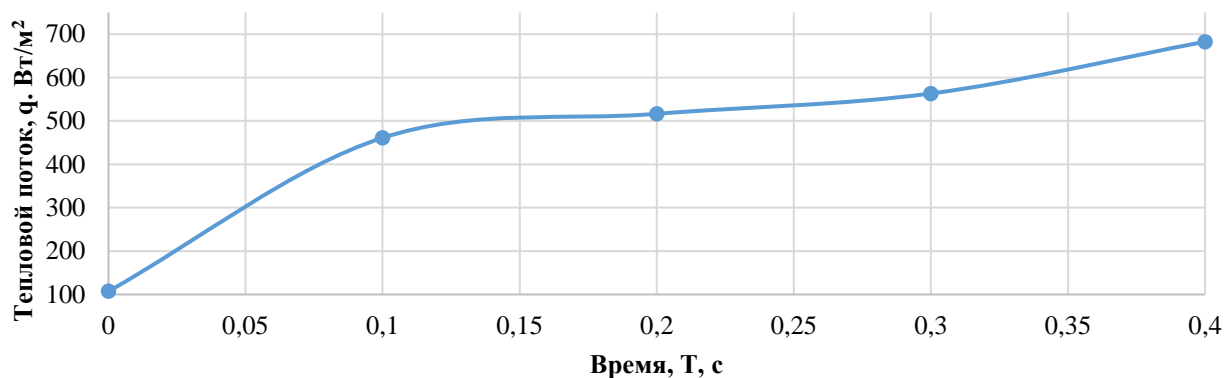


Рисунок 3.32 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при концентрационном пределе газа 5,0 % полученная в результате эксперимента

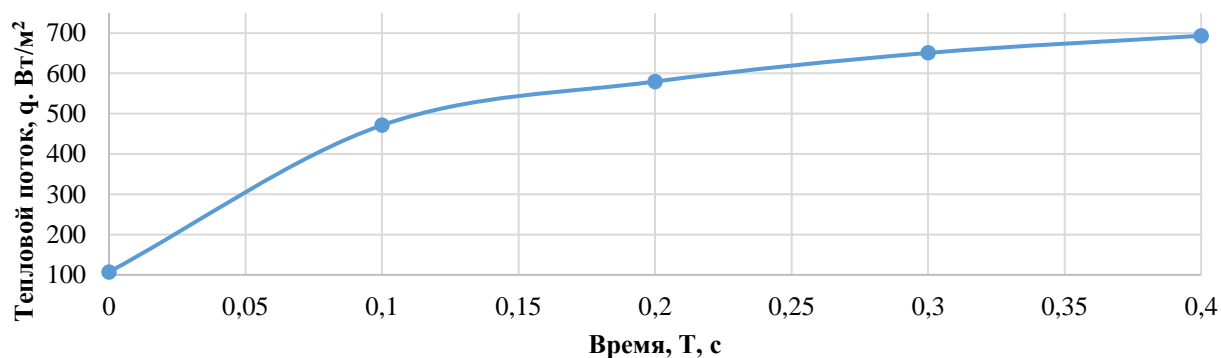


Рисунок 3.33 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при концентрационном пределе газа 6,5 % полученная в результате эксперимента

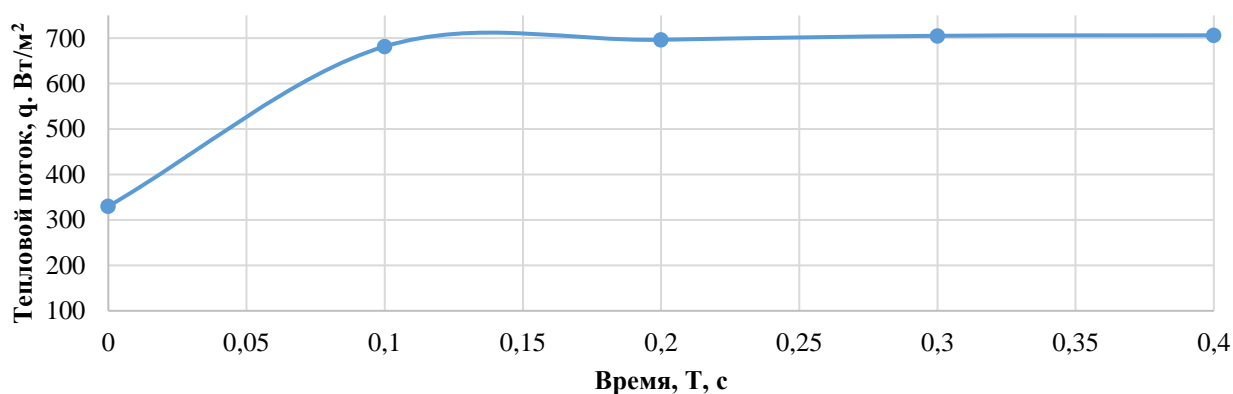


Рисунок 3.34 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при концентрационном пределе газа 8,0 % полученная в результате эксперимента

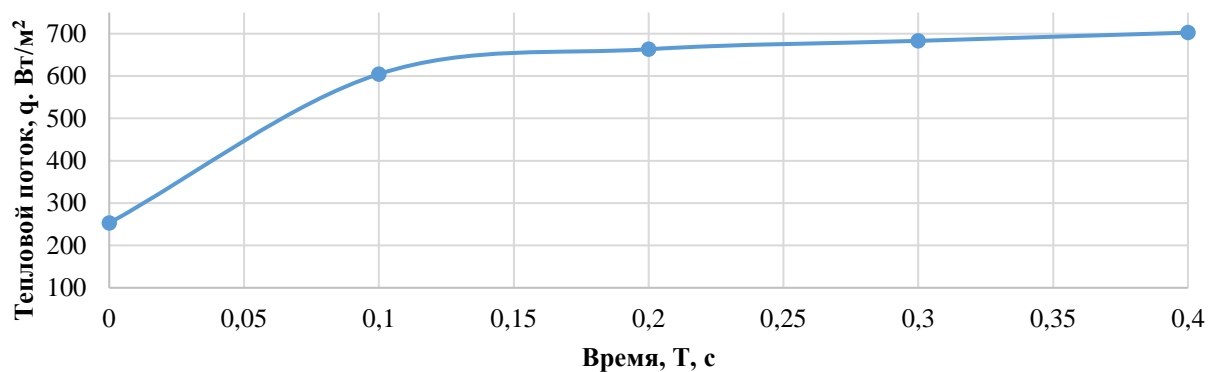


Рисунок 3.35– Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при концентрационном пределе газа 9,5 % полученная в результате эксперимента

Проведенный блок экспериментов был реализован при концентрациях от 2,0 до 9,5 %, что соответствует нижнему и верхнему концентрационным пределами. Стоит отметить, что максимальное значение теплового потока при отрицательной температуре смещено в область концентрационных пределов близких к ВКПР. При положительных температурах величина находится в районе середины. Как видно из рисунка 3.34, концентрация 8,0 % имеет наиболее мощный характер протекания взрыва.

На рисунке 3.36 представлены экспериментальные зависимости теплового потока, полученные при двух пограничных концентрациях. Мощность протекания процесса взрыва при 2,0 и 8,0 % отличается на величину порядка 20 % с увеличением к верхнему концентрационному пределу.

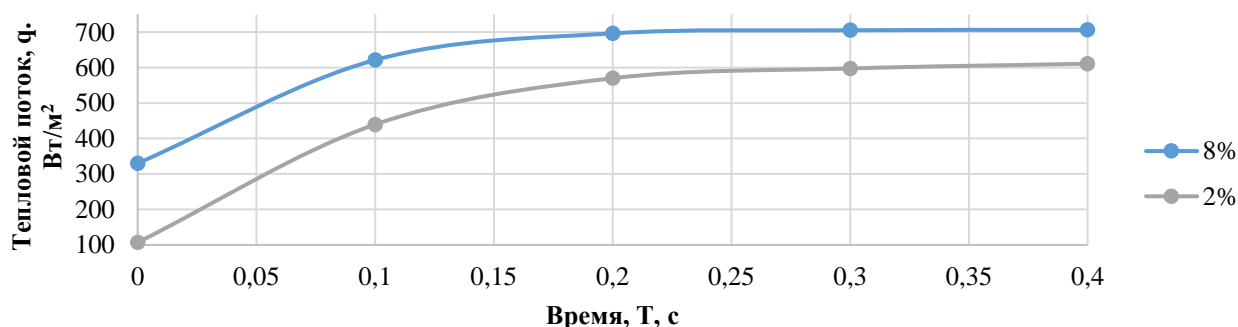


Рисунок 3.36 – Экспериментальные данные с датчика ДКТП полученные при концентрациях газа 8,0 %-6,5 %-2,0 % от основного объема рукава

На рисунке 3.37 представлена диаграмма экспериментальных данных для величин начального показания взрыва.

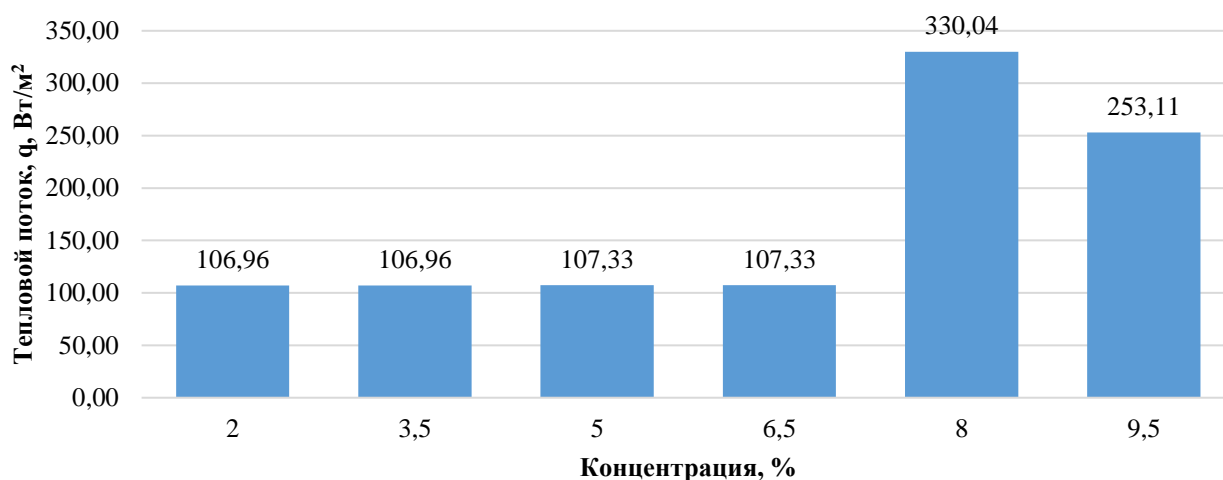


Рисунок 3.37 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от концентрации газа в Точке 1

Согласно данным диаграммы мощность протекания процесса взрыва в начальной точке развития отличается почти в 3 раза.

Далее представлены сравнения величин теплового потока в последующих точках измерения (рисунки 3.38 – 3.41).

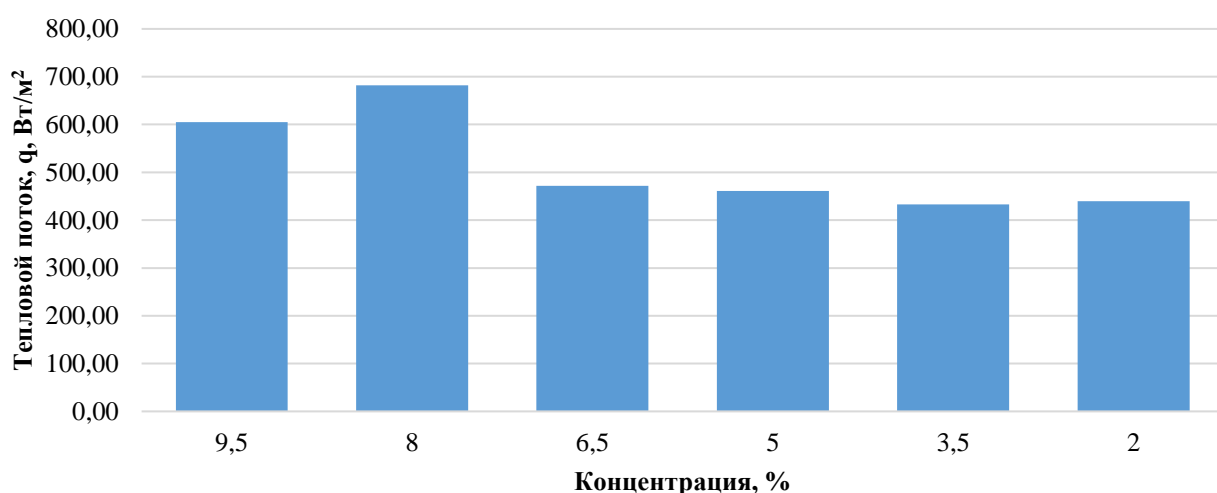


Рисунок 3.38 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от концентрации газа в Точке 2

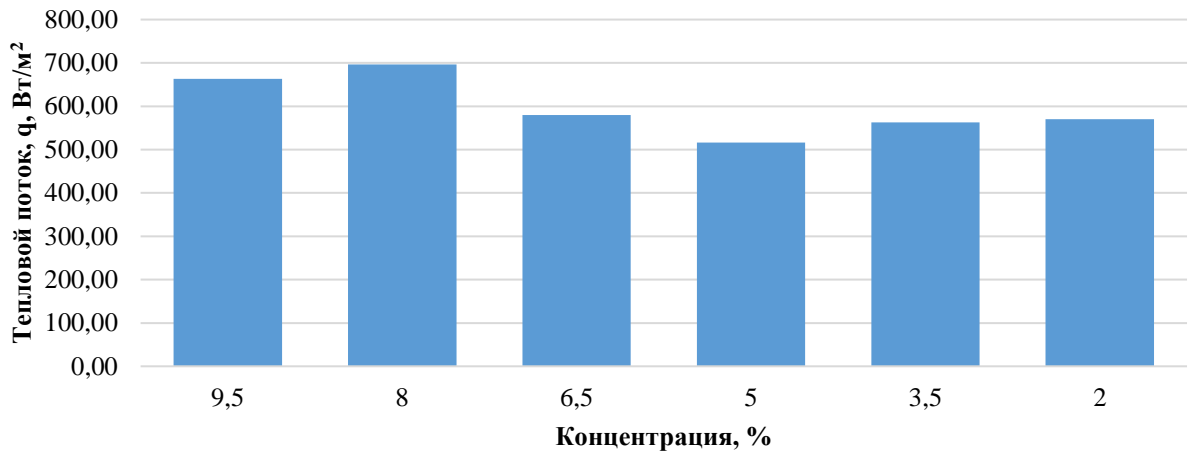


Рисунок 3.39 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от концентрации газа в Точке 3

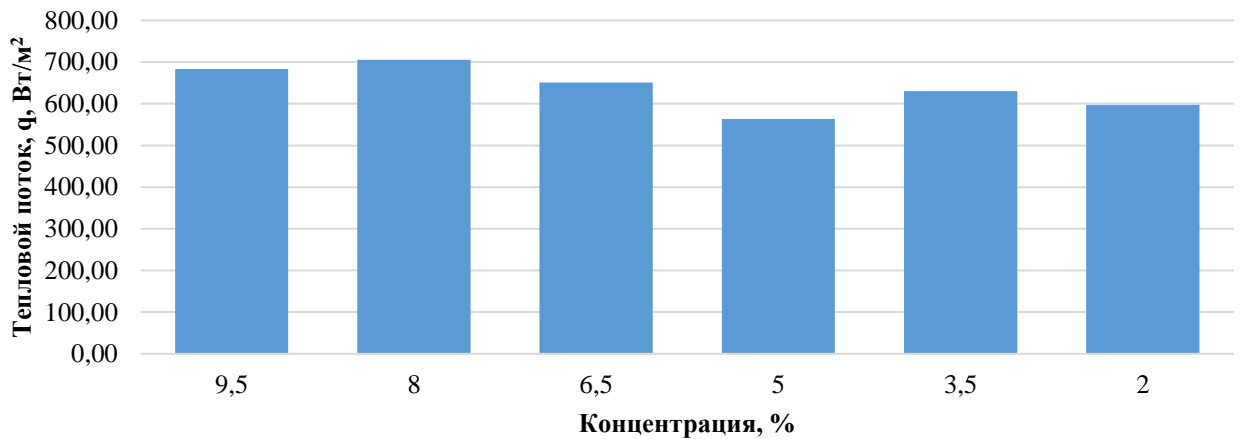


Рисунок 3.40 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от концентрации газа в Точке 4

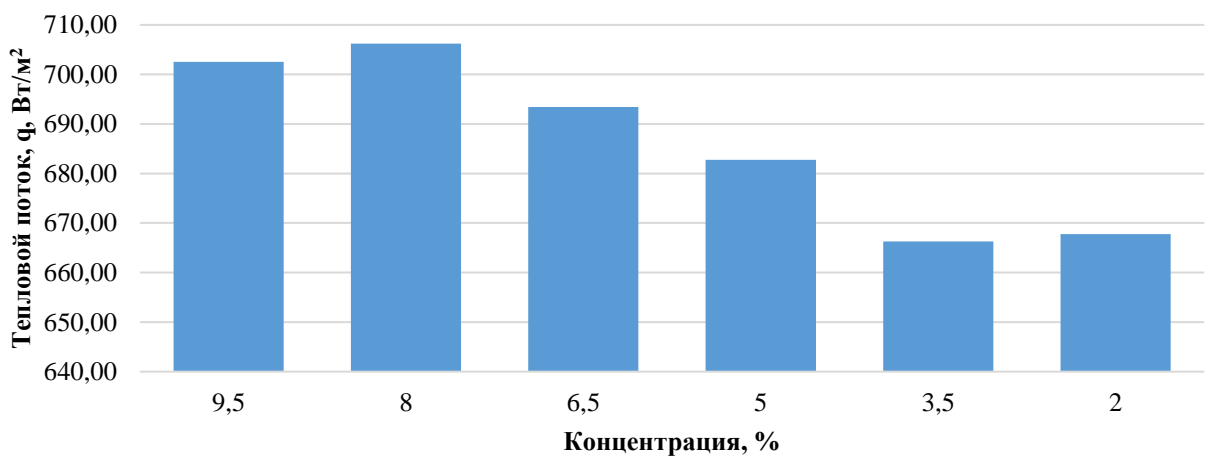


Рисунок 3.41 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от концентрации газа в Точке 5

Во второй части эксперимента за период с 2012 г. по 2017 г. был проведен ряд повторений взрыва (38 раз) при различных температурных показателях окружающей среды с постоянной величиной концентрации 8,0 % для выявления температуры, при которой сила взрыва будет наибольшей (рисунки 3.42 – 3.47).

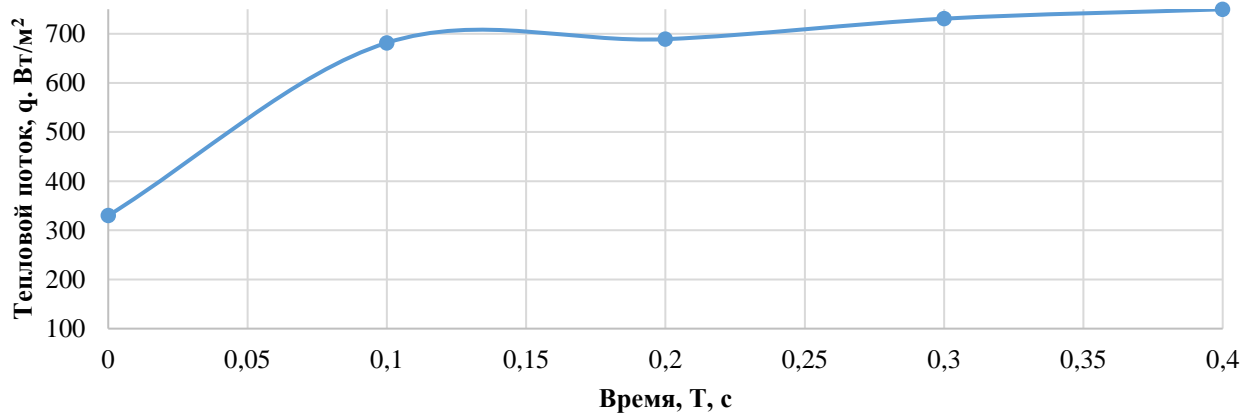


Рисунок 3.42 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при температуре окружающей среды минус 42 °С полученная в результате эксперимента

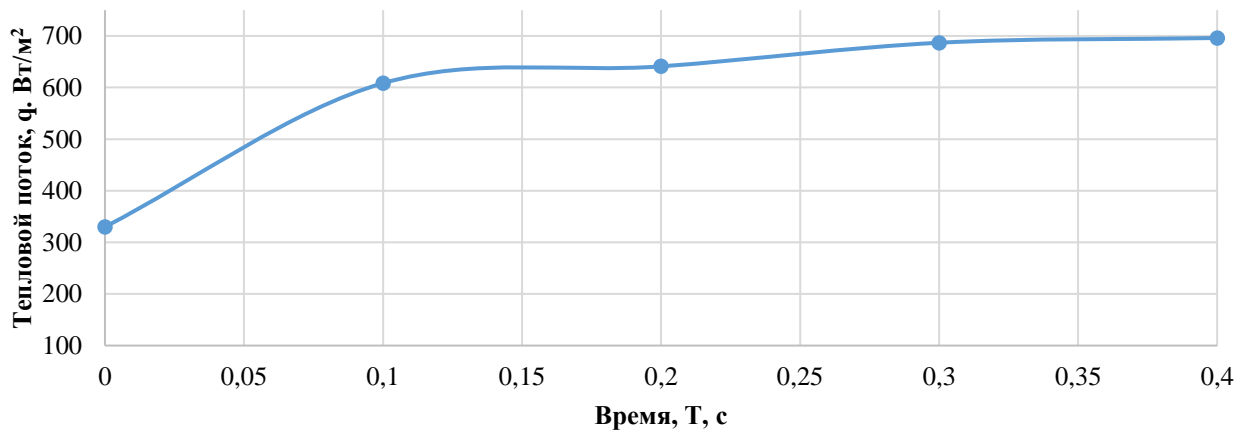


Рисунок 3.43 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при температуре окружающей среды минус 30 °С полученная в результате эксперимента

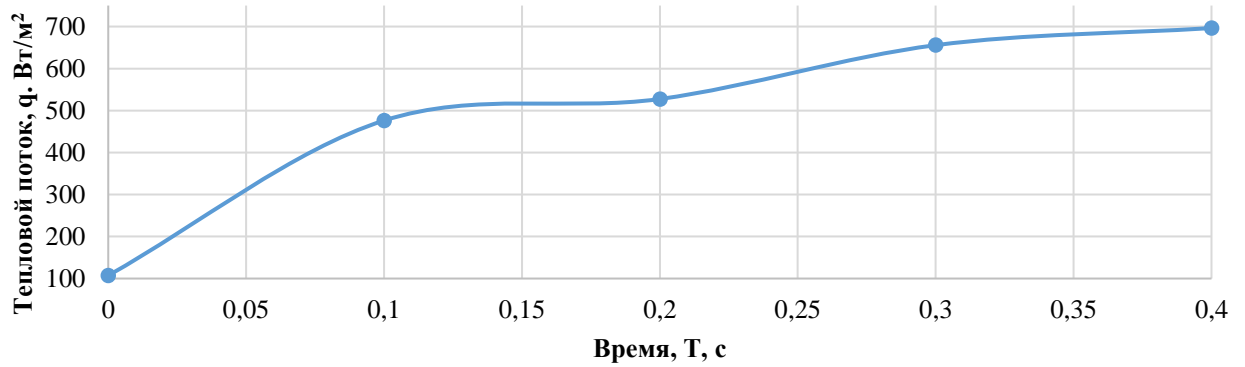


Рисунок 3.44 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при температуре окружающей среды минус 15 °С полученная в результате эксперимента

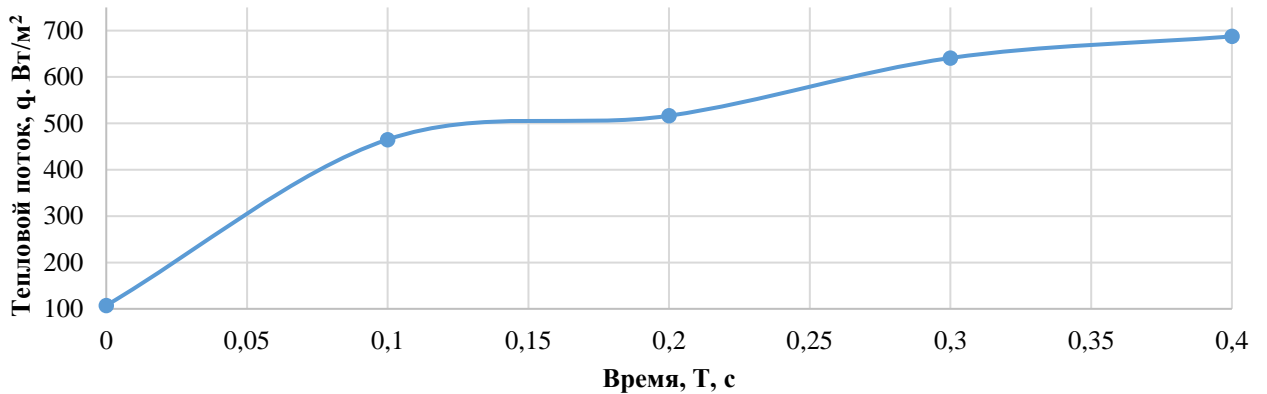


Рисунок 3.45 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при температуре окружающей среды 0 °С полученная в результате эксперимента

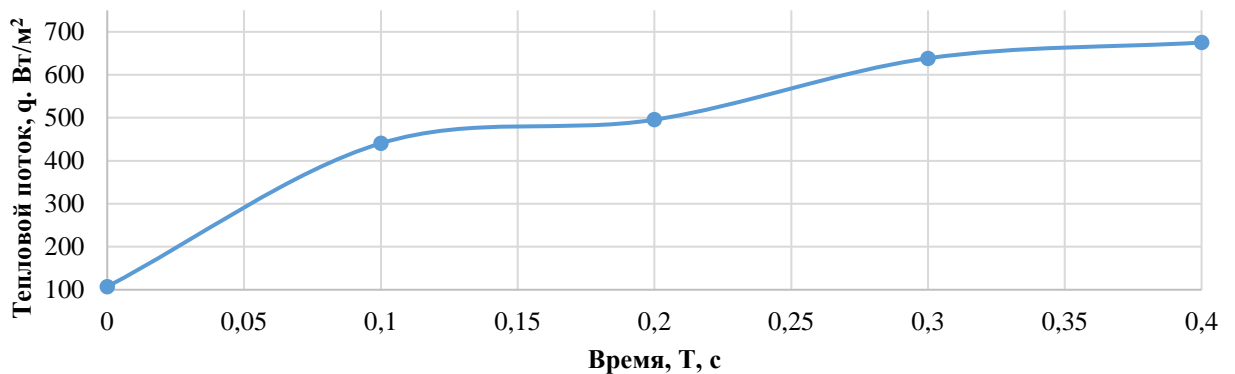


Рисунок 3.46 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при температуре окружающей среды плюс 40 °С полученная в результате эксперимента

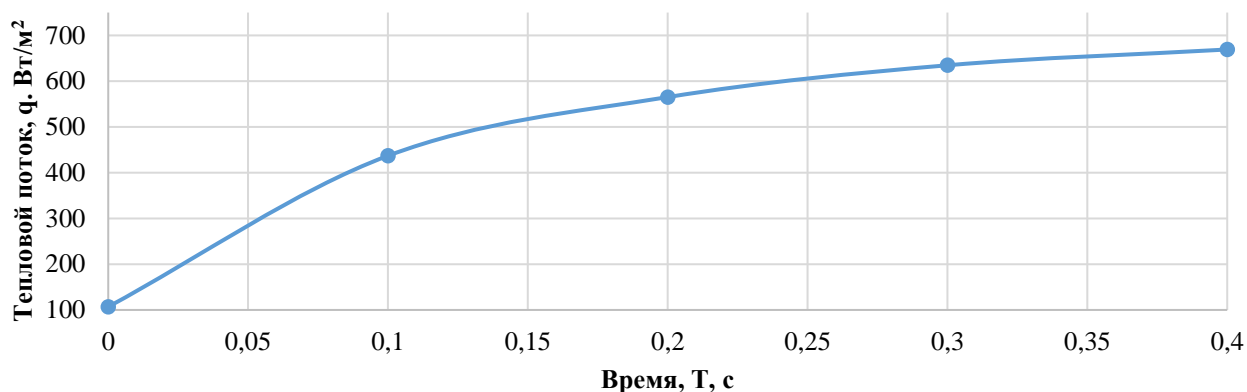


Рисунок 3.47 – Зависимость мощности взрыва (теплового потока) от времени протекания при температуре окружающей среды плюс 30 °С полученная в результате эксперимента

Согласно выявленным зависимостям мощность протекания процесса взрыва при плюс 30 °С и минус 42 °С отличается на величину порядка 31 %.

На рисунке 3.48 представлена диаграмма экспериментальных данных для величин начального показания взрыва при температурах окружающей среды минус 42 °С и плюс 30 °С.

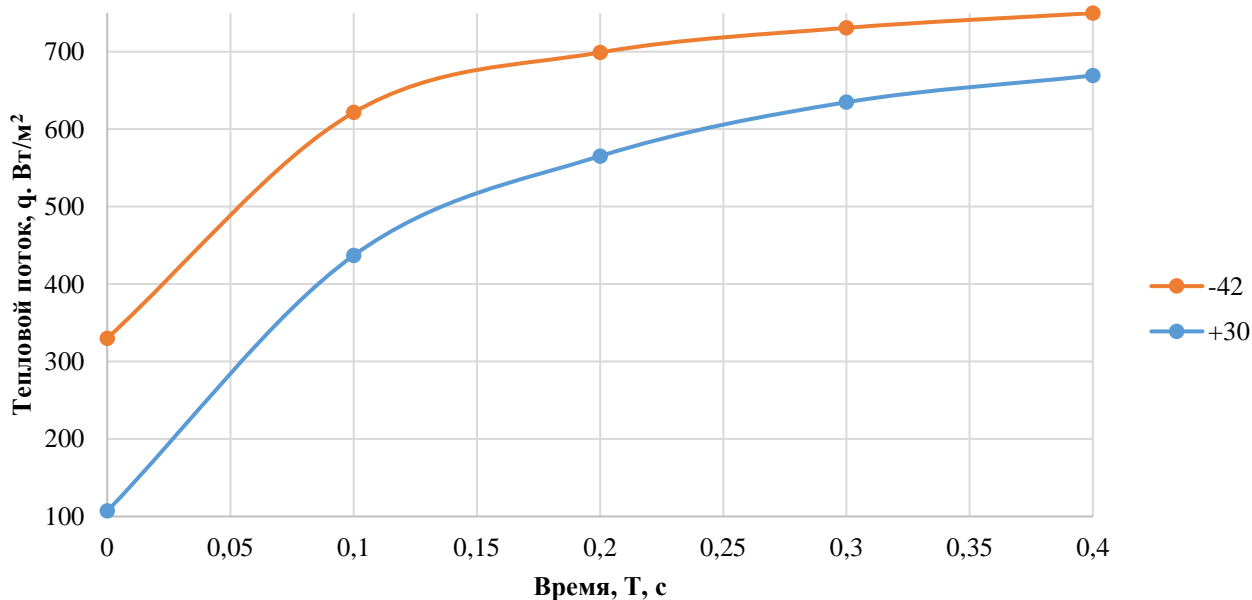


Рисунок 3.48 – Экспериментальные данные с датчика ДКТП полученные при температурах минус 42 °С и плюс 30 °С при постоянной концентрации 8,0 %

На рисунке 3.49 представлена диаграмма экспериментальных данных для величин начального показания взрыва.

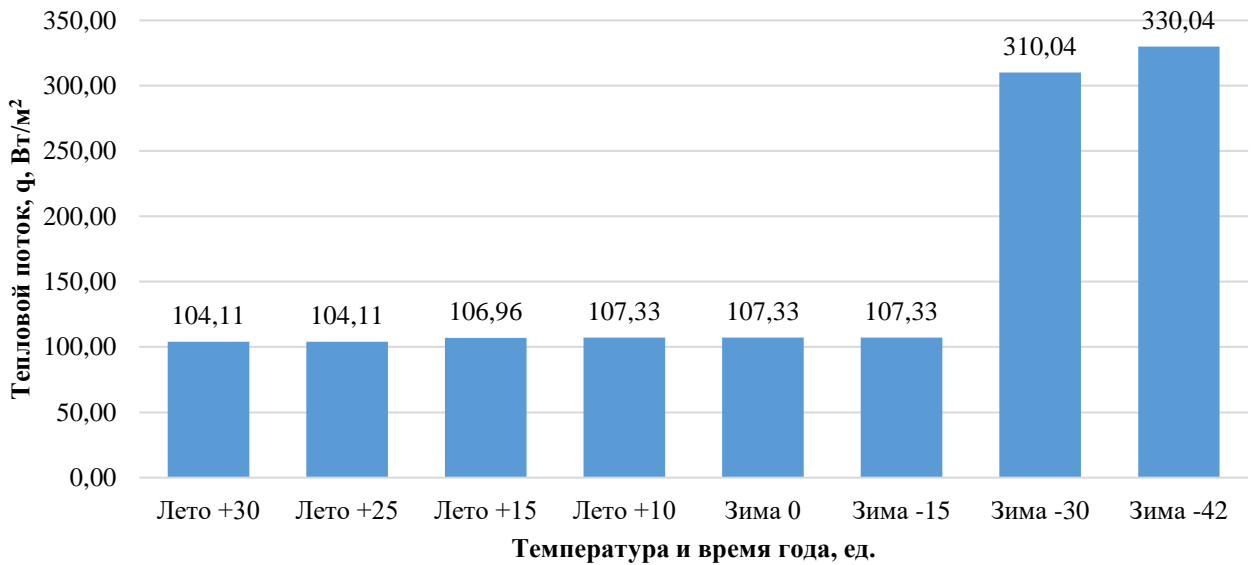


Рисунок 3.49 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от температуры и времени года в Точке 1

Установлено, что мощность протекание процесса взрыва в начальной точке развития для различных температур окружающей среды отличается почти в 3 раза.

Далее на рисунках 3.50 – 3.53 представлены сравнения величин теплового потока в каждой точке измерения.

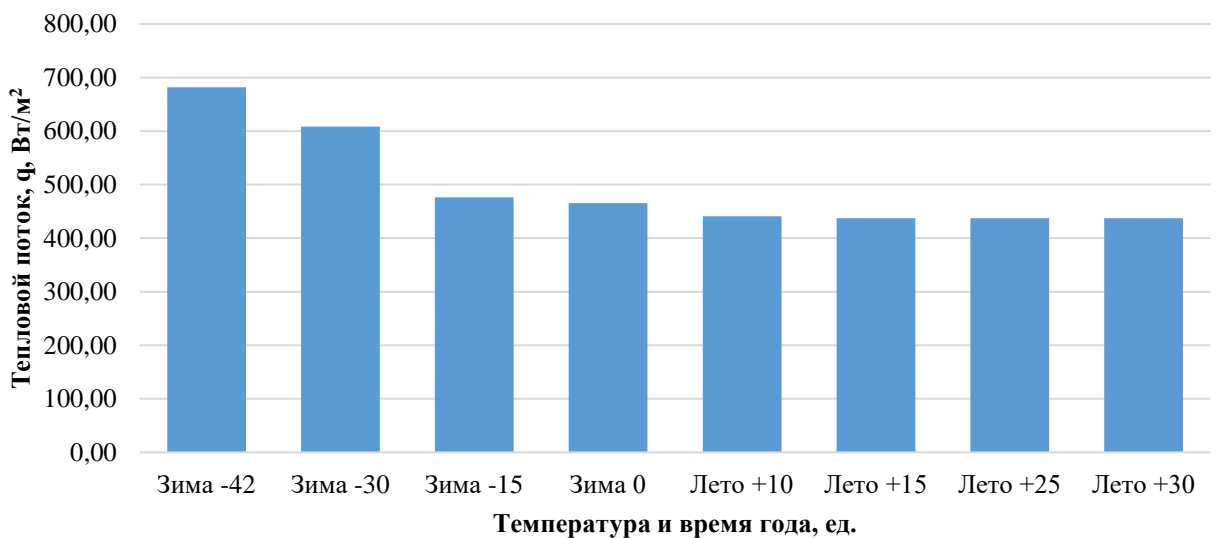


Рисунок 3.50 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от температуры и времени года в Точке 2



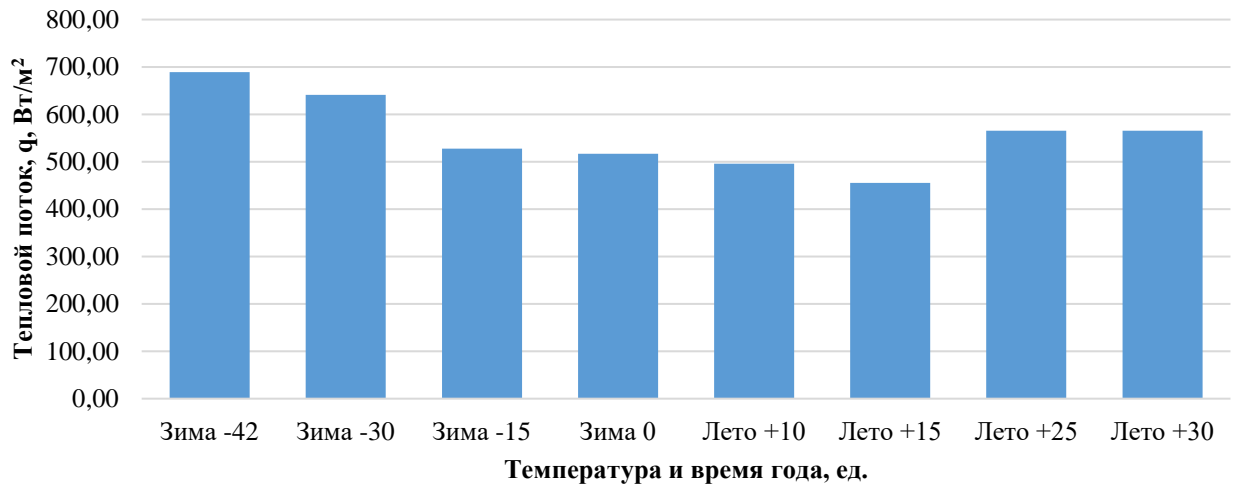


Рисунок 3.51 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от температуры и времени года в Точке 3

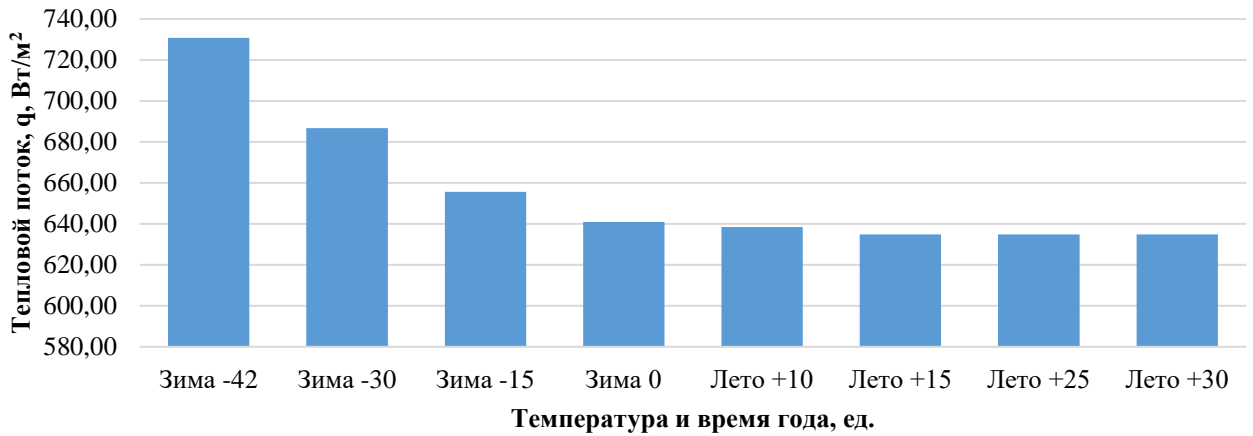


Рисунок 3.52 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от температуры и времени года в Точке 4

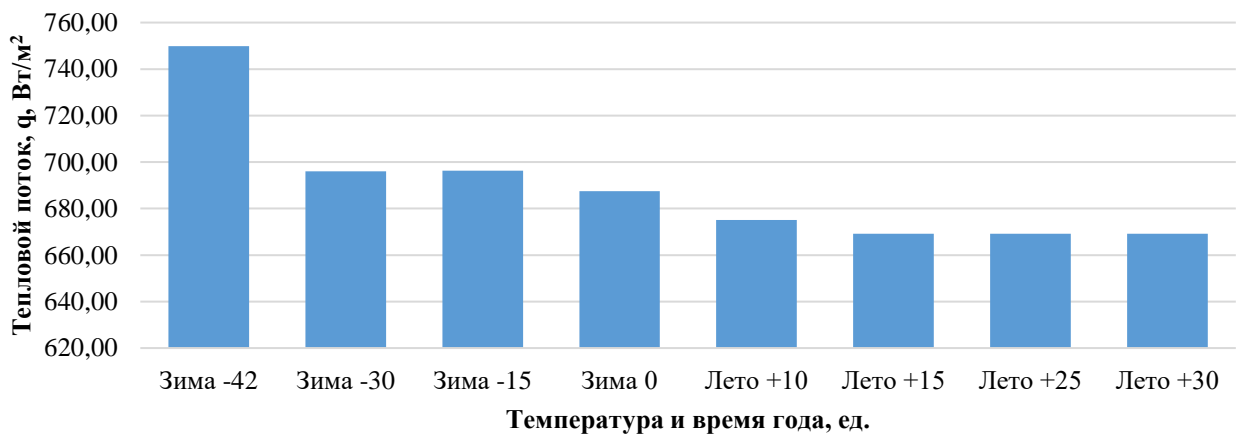


Рисунок 3.53 – Диаграмма экспериментальных данных с датчика ДКТП от температуры и времени года в Точке 5

Для апробации исследования особенностей взрывов газовой смеси в условиях низких температур была построена математическая модель взрыва ГВС.

### **3.5 Моделирование аварийного процесса ГВС в замкнутом объеме посредством программного комплекса FireCat PromRisk**

Для подтверждения экспериментальных данных было проведено построение трехмерной модели магистрального газопровода с начальными параметрами окружающей среды и течением газа, как и при эксперименте.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 1) выполнен анализ пожарной опасности магистральной линии газопровода, выявлены наиболее неблагоприятные сценарии возникновения и развития пожароопасных ситуаций;
- 2) выбраны методы прогноза последствий при авариях;
- 3) проведен прогноз неблагоприятных последствий;
- 4) рассчитаны значения теплового потока.

На основании приведенных расчетных данных была построена модель взрыва ГВС в замкнутом объеме в программном комплексе FireCat PromRisk.

Объект представлял собой отрезок магистральной линии 2000 см, диаметром 110 см и толщиной стенки 0,1 см. Модель объекта представлена на рисунке 3.54.

ГВС состояла из воздуха и природного газа. Начальная температура газовой смеси принята плюс 20 °С, окружающей среды минус 30 °С.

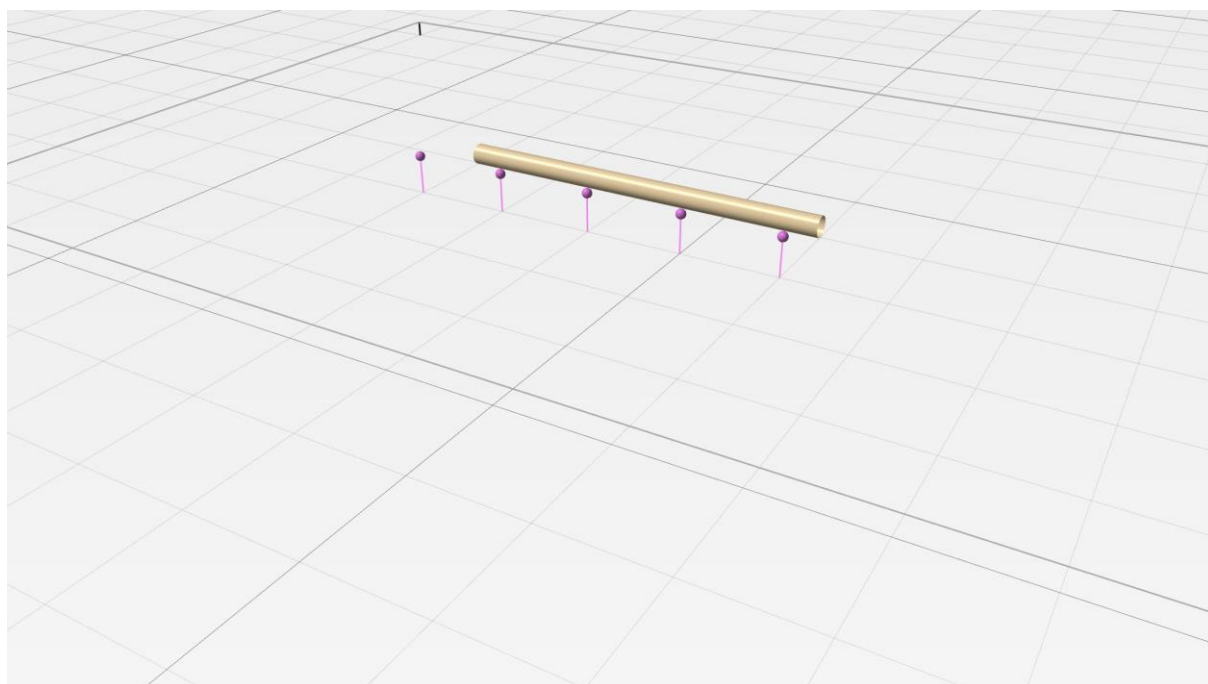


Рисунок 3.54 – Общий вид модели объекта

Краткая характеристика исходных данных представлена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Краткая характеристика исходных данных

Параметр	Значение
Горючая нагрузка	Природный газ
Типовые аварийные события	да
Состояние газа	Сжиженный
Давление	0,2 МПа
Температура газа	20 °С
Внутренний диаметр	1100 мм
Толщина стенки	1 мм
Длина	20 м
Подземный	нет
Переход через искусственные препятствия	нет
Улучшенные материалы и средства контроля	нет
Улучшенная защита от коррозии	нет
Расчетное время отключения	300 с

Характеристики климатической зоны приняты по [94, 95] (Красноярск) и представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Характеристики климатической зоны

Направление ветра	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Вероятность, %	4	9	10	3	11	41	16	6
Скорость ветра, м/с	2	2,2	2,2	1,4	2,8	3	2,4	2,3

Характеристики территории представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Характеристики территории

Параметр	Значение
Класс загроможденности пространства	IV - слабо загромождение и свободное пространство
Тип поверхности	Неспланированная грунтовая поверхность

Характеристика горючего вещества представлена в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Характеристика горючего вещества

Параметр	Значение
Описание	Природный газ, смесь газов
Нижний концентрационный предел распространения пламени	2,0 % об.
Верхний концентрационный предел распространения пламени	9,0 % об.
Температура кипения	минус 158 °С
Плотность жидкой фазы	415 кг/м <sup>3</sup>
Критическое давление	4,63 МПа
Критическая температура	191 К
Мольная теплота испарения	8190 Дж/моль
Удельная теплоемкость жидкости	3450 Дж/(кг·К)
Класс чувствительности	4
Корректировочный параметр	1,14

Частота реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий на оборудовании, частоты утечек из технологических трубопроводов - принимались в соответствии с приложением 1 методики [96] и приложением 2 [97].

Перечень пожароопасных ситуаций и сценариев их развития представлен в таблице 3.10.

Проведем расчет массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения пожароопасных ситуаций.

Таблица 3.10 – Перечень пожароопасных ситуаций и сценариев их развития

Номер сценария	Наименование пожароопасной ситуации	Сценарий развития пожароопасной ситуации
1	Разгерметизация 20 мм	Пожар пролива
2	Разгерметизация 110 мм	Пожар пролива
3	Разрушение	Пожар пролива

Расчет выполнен для следующих возможных сценариев:

- разгерметизация 20 мм;
- разгерметизация 110 мм;
- разрушение.

### 3.5.1 Разгерметизация 20 мм

Относительная доля разгерметизаций по причине внешнего воздействия определяется по формуле (3.4):

$$f_{11} = f_{11\text{ср}} \times k_{\text{тс}} \times k_{\text{эт}} \times k_{\text{ннб}} \times k_{\text{пер1}}, \quad (3.4)$$

где  $f_{11\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных внешним воздействием и проколом (трещиной), %;

$k_{\text{тс}}$  – поправочный коэффициент, зависящий от толщины стенки трубопровода дельта, мм;

$k_{\text{эт}}$  – поправочный коэффициент, зависящий от минимальной глубины заложения трубопровода, м;

$k_{\text{ннб}}$  – поправочный коэффициент, для участков переходов, выполненных методом наклоннонаправленного бурения, ед.;

$k_{\text{пер1}}$  – поправочный коэффициент, переходов через искусственные препятствия, ед.

$$f_{11} = 13,2 \times 3,955 \times 1 \times 1 \times 1 = 52,21$$

Относительная доля разгерметизаций по причине брака строительства и дефекта материалов определяется по формуле (3.5):

$$f_{21} = f_{21\text{ср}} \times k_{\text{бд}}, \quad (3.5)$$

где  $f_{21\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных браком строительства (дефектом материалов) и проколом (трещиной), %;

$k_{\text{бд}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий применение материалов и средств контроля при строительстве, ед.

$$f_{21} = 10,6 \times 1 = 10,6$$

Относительная доля разгерметизаций по причине коррозии определяется по формуле (3.6):

$$f_{31} = f_{31\text{ср}} \times k_{\text{ктс}} \times k_{\text{кпз}}, \quad (3.6)$$

где  $f_{31\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных коррозией и проколом (трещиной), %;

$k_{\text{ктс}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние толщины стенки трубопровода (мм) на частоту разгерметизации по причине коррозии, ед;

$k_{\text{кпз}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние применяемых систем защиты от коррозии, ед.

$$f_{31} = 15,2 \times 2 \times 1 = 30,4$$

Относительная доля разгерметизаций по причине движения грунта,

вызванного природными явлениями определяется по формуле (3.7):

$$f_{41} = f_{41\text{ср}} \times k_{\text{дгд}} \times k_{\text{пер2}}, \quad (3.7)$$

где  $f_{41\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных движением грунта и проколом (трещиной), %;

$k_{\text{дгд}}$  – поправочный коэффициент, зависящий от диаметра трубопровода  $D$  (мм), ед;

$k_{\text{пер2}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий прохождение трассы трубопровода через водные преграды и заболоченные участки, ед.

$$f_{41} = 1,8 \times 0,276 \times 1 = 0,5$$

Относительная доля разгерметизаций по причине ошибок оператора определяется по формуле (3.8):

$$f_{51} = f_{51\text{ср}} \times k_{\text{оп}}, \quad (3.8)$$

где  $f_{51\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных ошибками оператора и проколом (трещиной), %;

$k_{\text{оп}}$  – поправочный коэффициент, зависящий от диаметра трубопровода  $D$  (мм), ед.

$$f_{51} = 3 \times 0,035 = 0,11$$

Относительная доля разгерметизаций по причине ошибок оператора определяется по формуле (3.9):

$$f_{61} = f_{61\text{ср}} = 6,5, \quad (3.9)$$

где  $f_{61cp}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных неизвестными причинами, %.

Удельная частота разгерметизаций определяется по формуле (3.10):

$$\lambda_1 = 1,4 \cdot 10^{-7} \times \sum_{i=1}^6 f_{i1} / 100, \quad (3.10)$$

$$\lambda_1 = 1,404 \times 10^{-7} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$$

При длине участка 20 м частота разгерметизаций составляет  $2,809 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ .

Массовый расход истечения жидкой фазы определяется по формуле (3.11):

$$G_{ж} = \mu \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \sqrt{\frac{P_c \times M}{R \times T_c} \times P_c \times (0,167 \times P_R^5 + 0,534 \times P_R^{1,95})} \times \frac{\sqrt{\frac{\rho_L \times P_R}{\rho_V}}}{1,22 \times T_R^{3/2}}, \quad (3.11)$$

где  $\mu$  – коэффициент истечения;

$d$  – диаметр трубопровода, м;

$P_c$  – критическое давление сжиженного газа, Па;

$M$  – молярная масса, кг/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(К х моль);

$T_c$  – критическая температура сжиженного газа, К;

$P_c$  – плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>;

$P_R$  – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_L$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_V$  – плотность газа в резервуаре при давлении  $\rho_V$ , кг/м<sup>3</sup>;

$T_R$  – безразмерная температура сжиженного газа.



$$G_{\text{ж}} = 0,8 \times 3,142 \times 10^{-4} \times \sqrt{\frac{4,63 \times 10^6 \times 16 \times 10^{-3}}{8,31 \times 191}} \times 4,63 \times 10^6 \times \\ \times \sqrt{0,167 \times 0,04^5 + 0,534 \times 0,04^{1,95}} \times \frac{\sqrt{\frac{415}{2,28} \times 0,04}}{1,22 \times 1,63^{3/2}} = 0,14 \text{ кг/с}$$

Объемный расход истечения (3.12):

$$Q_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}, \quad (3.12)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>.

$$Q_{\text{ж}} = 0,14 / 415 = 0,0003 \text{ м}^3/\text{с}$$

Объем вышедшего сжиженного газа:

$$V_{\text{ж}} = 0,0003 \times 300 = 0,1 \text{ м}^3$$

Масса вышедшего газа (3.13):

$$m_{\text{ж}} = V_{\text{ж}} \times \rho_{\text{ж}}, \quad (3.13)$$

$$m_{\text{ж}} = 0,1 \times 415 = 41,9 \text{ кг}$$

В процессе выхода сжиженного газа из оборудования часть его мгновенно испаряется, образуя с капельками жидкости облако аэрозоля. Мгновенно испаряющаяся жидкость рассчитывается по (3.14):

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_p(T_a - T_b)}{L_g}\right), \quad (3.14)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость СУГ, Дж/(кг × К);

$T_a$  – температура окружающего воздуха, К;

$T_b$  – температура кипения СУГ при атмосферном давлении, К;

$L_g$  – удельная теплота парообразования СУГ, Дж/кг.

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{3450(38 - (-158))}{511875}\right) = 0,733$$

Оставшаяся часть жидкости образует пролив. Объем жидкости в проливе определяется по формуле (3.15):

$$V_{\text{пр}} = (1 - \delta) \times V_{\text{ж}}, \quad (3.15)$$

$$V_{\text{пр}} = (1 - 0,733) \times 0,1 = 0,027 \text{ м}^3$$

Максимальная площадь пролива для данного объема жидкости (3.16):

$$F_{\text{П}} = f_{\text{р}} \times V_{\text{пр}}, \quad (3.16)$$

где  $f_{\text{р}}$  – коэффициент разлития, м<sup>-1</sup>;

$$F_{\text{П}} = 5 \times 0,027 = 0,1 \text{ м}^2$$

Радиус круга, описывающего площадь горения, составляет 0,2 м.

Масса вылившейся жидкости (3.17):

$$m_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \times \rho_{\text{ж}}, \quad (3.17)$$

$$m_{\text{пр}} = 0,027 \times 415 = 11,2 \text{ кг}$$

Время испарения до появления источника зажигания: 900 с

Испарение жидкости с поверхности пролива происходит за счет потока тепла от подстилающей поверхности. Интенсивность испарения определяется по формуле (3.18):

$$W = \frac{(\lambda_s \times C_s \times \rho_s)^{0,5} \times (T_0 - T_b)}{L_g \times (\pi \times t_{\text{и}})^{0,5}}, \quad (3.18)$$

где  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость, Вт/(м х К);

$C_s$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг х К);

$\rho_s$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{\text{и}}$  – текущее время с момента начала испарения, с

По мере охлаждения подстилающей поверхности интенсивность испарения уменьшается от  $1,52 \times 10^{-1}$  кг/(с·м<sup>2</sup>) в начале процесса до  $8,01 \times 10^{-3}$  кг/(с·м<sup>2</sup>) (при  $t_{\text{и}} = 3600$  с).

За 3600 с масса паров, образовавшихся с поверхности пролива, составит (3.19):

$$m_{\text{п.пр}} = F_{\text{п}} \times \int_0^{3600} \frac{(\lambda_s \times C_s \times \rho_s)^{0,5} \times (T_0 - T_b)}{L_g \times (\pi \times t_{\text{и}})^{0,5}} dt_{\text{и}}, \quad (3.19)$$

$$m_{\text{п.пр}} = 0,1 \times \int_0^{3600} \frac{(1,5 \times 2000 \times 2000)^{0,5} \times (20 - (-158))}{511875 \times (\pi \times t_{\text{и}})^{0,5}} dt_{\text{и}} = 7,4 \text{ кг}$$

Общая масса паров составит (3.20):

$$m_{\text{п}} = \delta \times G_{\text{ж}} \times t_{\text{откл}} + m_{\text{п.пр}}, \quad (3.20)$$

где  $t_{\text{откл}}$  – расчетное время отключения трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, с

$$m_{\text{п}} = 0,733 \times 0,14 \times 300 + 7,4 = 38 \text{ кг}$$

Трехмерная визуализация аварийной ситуации при разгерметизации 20 мм представлена на рисунке 3.55.

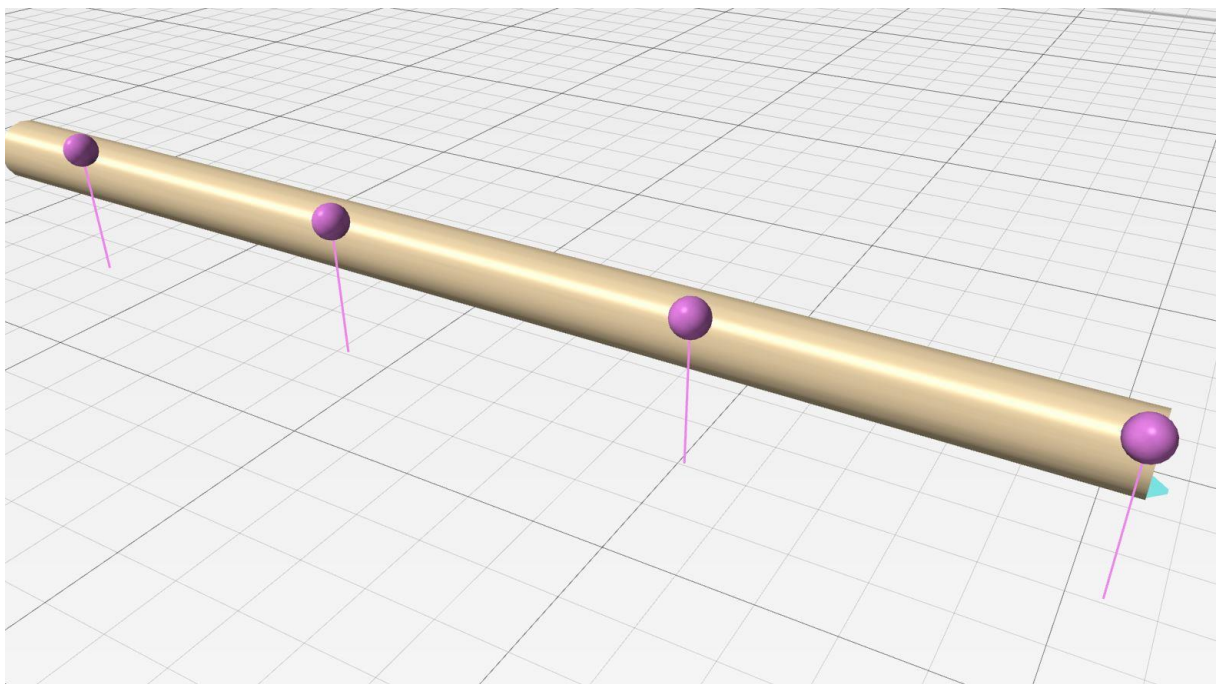


Рисунок 3.55 – Разгерметизация 20 мм

### 3.5.2 Разгерметизация 110 мм

Относительная доля разгерметизаций по причине внешнего воздействия (3.21):

$$f_{12} = f_{12\text{ср}} \times k_{\text{тс}} \times k_{\text{зт}} \times k_{\text{ннб}} \times k_{\text{пер1}}, \quad (3.21)$$

где  $f_{12\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных внешним воздействием и отверстием, %.

$$f_{12} = 26,6 \times 3,955 \times 1 \times 1 \times 1 = 105,21$$

Относительная доля разгерметизаций по причине брака строительства и дефекта материалов (3.22):

$$f_{22} = f_{22\text{ср}} \times k_{\text{бд}}, \quad (3.22)$$

где  $f_{22\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных браком строительства и отверстием, %.

$$f_{22} = 4,7 \times 1 = 4,7$$

Относительная доля разгерметизаций по причине коррозии (3.23):

$$f_{32} = f_{32\text{ср}} \times k_{\text{ктс}} \times k_{\text{кпз}}, \quad (3.23)$$

где  $f_{32\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных коррозией и отверстием, %.

$$f_{32} = 0,2 \times 2 \times 1 = 0,4$$

Относительная доля разгерметизаций по причине движения грунта, вызванного природными явлениями (3.24):

$$f_{42} = f_{42\text{ср}} \times k_{\text{дгд}} \times k_{\text{пер2}}, \quad (3.24)$$

где  $f_{42\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных движением грунта и отверствием, %.

$$f_{42} = 2,2 \times 0,276 \times 1 = 0,61$$

Относительная доля разгерметизаций по причине ошибок оператора (3.25):

$$f_{52} = f_{52\text{ср}} \times k_{\text{оп}}, \quad (3.25)$$

где  $f_{52\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных ошибкой оператора и отверствием, %.

$$f_{52} = 1,6 \times 0,035 = 0,06$$

Относительная доля разгерметизаций по причине ошибок оператора (3.26):

$$f_{62} = f_{62\text{ср}} = 0,2, \quad (3.26)$$

где  $f_{62\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных неизвестными причинами, %.

Удельная частота разгерметизаций составляет (3.27):

$$\lambda_2 = 1,4 \cdot 10^{-7} \times \sum_{i=1}^6 f_{i2} / 100, \quad (3.27)$$

$$\lambda_2 = 1,556 \times 10^{-7} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$$

При длине участка 20 м частота разгерметизаций составляет  $3,113 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ .

Массовый расход истечения жидкой фазы:

$$G_{\text{ж}} = 0,8 \times 9,503 \times 10^{-3} \times \sqrt{\frac{4,63 \times 10^6 \times 16 \times 10^{-3}}{8,31 \times 191}} \times 4,63 \times 10^6 \times \\ \times \sqrt{0,167 \times 0,04^5 + 0,534 \times 0,04^{1,95}} \times \frac{\sqrt{\frac{415}{2,28} \times 0,04}}{1,22 \times 1,63^{3/2}} = 4,221 \text{ кг/с}$$

Объемный расход истечения:

$$Q_{\text{ж}} = 4,221/415 = 0,0102 \text{ м}^3/\text{с}$$

Объем вышедшего сжиженного газа:

$$V_{\text{ж}} = 0,0102 \times 300 = 3,05 \text{ м}^3$$

Масса вышедшего газа:

$$m_{\text{ж}} = 3,05 \times 415 = 1266,4 \text{ кг}$$

При выбросе сжиженного газа из оборудования часть продукта за счет внутренней энергии мгновенно испаряется, образуя с капельками жидкости облако аэрозоля. Доля мгновенно испаряющейся жидкости:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{3450(38 - (-158))}{511875}\right) = 0,733$$

Оставшаяся часть жидкости образует пролив. Объем жидкости в проливе:

$$V_{\text{пр}} = (1 - 0,733) \times 3,05 = 0,814 \text{ м}^3$$

Максимальная площадь пролива для данного объема жидкости

$$F_{\Pi} = 5 \times 0,814 = 4,1 \text{ м}^2$$

Радиус круга, описывающего площадь горения, составляет 1,1 м.

Масса вылившейся жидкости:

$$m_{\text{пр}} = 0,814 \times 415 = 338 \text{ кг}$$

Время испарения до появления источника зажигания: 3600 с.

Испарение жидкости с поверхности пролива происходит за счет потока тепла от подстилающей поверхности. По мере охлаждения подстилающей поверхности интенсивность испарения уменьшается от  $1,52 \times 10^{-1} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  в начале процесса до  $8,01 \times 10^{-3} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  (при  $t_{\text{и}} = 3600 \text{ с}$ ).

За 3600 с масса паров, образовавшихся с поверхности пролива, составит:

$$m_{\text{п.пр}} = 4,1 \times \int_0^{3600} \frac{(1,5 \times 2000 \times 2000)^{0,5} \times (20 - (-158))}{511875 \times (\pi \times t_{\text{и}})^{0,5}} dt_{\text{и}} = 222,4 \text{ кг}$$

Общая масса паров составит:

$$m_{\text{п}} = 0,733 \times 4,221 \times 300 + 222,4 = 1150,9 \text{ кг}$$

Трехмерная визуализация аварийной ситуации при разгерметизации 110 мм представлена на рисунке 3.56.



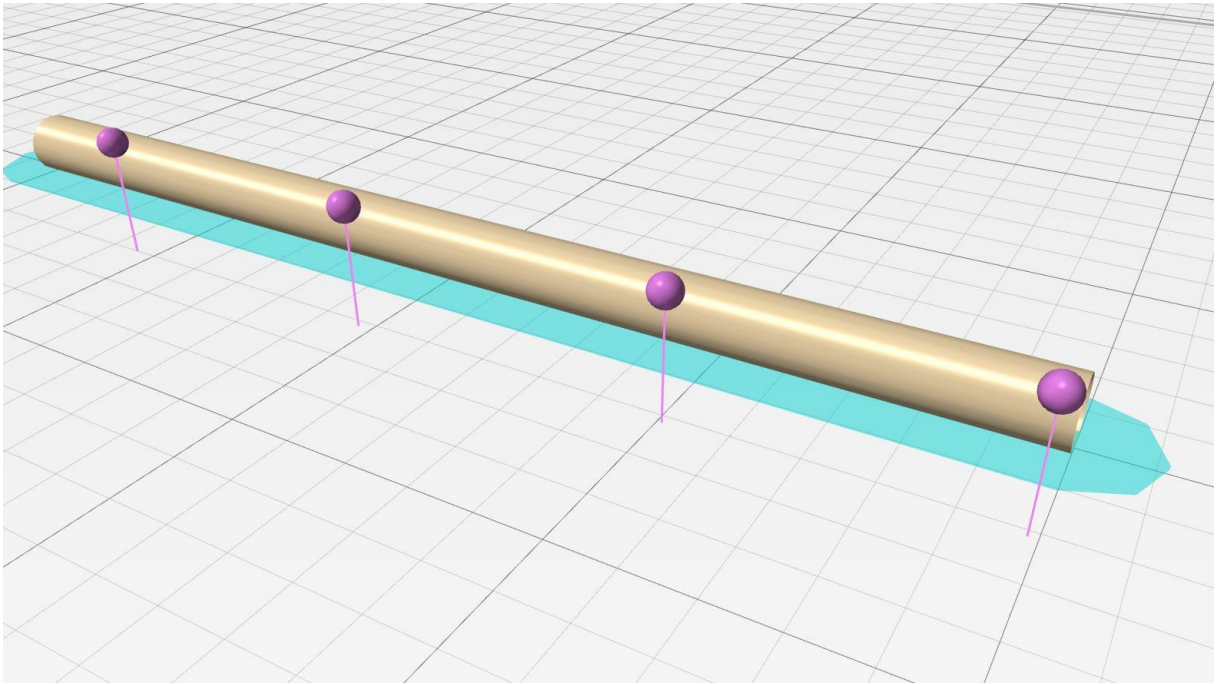


Рисунок 3.56 – Разгерметизация 110 мм

### 3.5.3 Разрушение

Относительная доля разгерметизаций по причине внешнего воздействия (3.28):

$$f_{13} = f_{13\text{ср}} \times k_{\text{тс}} \times k_{\text{зт}} \times k_{\text{ннб}} \times k_{\text{пер1}}, \quad (3.28)$$

где  $f_{13\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных внешним воздействием и разрывом, %.

$$f_{13} = 9,7 \times 3,955 \times 1 \times 1 \times 1 = 38,36$$

Относительная доля разгерметизаций по причине брака строительства и дефекта материалов (3.29):

$$f_{23} = f_{23\text{ср}} \times k_{\text{бд}}, \quad (3.29)$$

где  $f_{23\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных браком строительства и разрывом, %.

$$f_{23} = 1,2 \times 1 = 1,2$$

Относительная доля разгерметизаций по причине коррозии (3.30):

$$f_{33} = f_{33\text{ср}} \times k_{\text{ктс}} \times k_{\text{кпз}}, \quad (3.30)$$

где  $f_{33\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных коррозией и разрывом, %.

$$f_{33} = 0 \times 2 \times 1 = 0$$

Относительная доля разгерметизаций по причине движения грунта, вызванного природными явлениями (3.31):

$$f_{43} = f_{43\text{ср}} \times k_{\text{дгд}} \times k_{\text{пер2}}, \quad (3.31)$$

где  $f_{43\text{ср}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных движением грунта и разрывом, %

$$f_{43} = 3,3 \times 0,276 \times 1 = 0,91$$

Относительная доля разгерметизаций по причине ошибок оператора (3.32):

$$f_{53} = f_{53\text{ср}} \times k_{\text{оп}}, \quad (3.32)$$

где  $f_{53\text{cp}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных ошибкой оператора и разрывом, %

$$f_{53} = 0 \times 0,035 = 0$$

Относительная доля разгерметизаций по причине ошибок оператора (3.33):

$$f_{63} = f_{63\text{cp}} = 0, \quad (3.33)$$

где  $f_{63\text{cp}}$  – среднестатистическая относительная доля аварии, вызванных неизвестными причинами, %

Удельная частота разгерметизаций составляет:

$$\lambda_3 = 5,666 \times 10^{-8} \text{ год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$$

При длине участка 20 м частота разгерметизаций составляет  $1,133 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ .

Массовый расход истечения жидкой фазы:

$$G_{\text{ж}} = 0,8 \times 9,503 \times 10^{-1} \times \sqrt{\frac{4,63 \times 10^6 \times 16 \times 10^{-3}}{8,31 \times 191}} \times 4,63 \times 10^6 \times \\ \times \sqrt{0,167 \times 0,04^5 + 0,534 \times 0,04^{1,95}} \times \frac{\sqrt{\frac{415}{2,28} \times 0,04}}{1,22 \times 1,63^{3/2}} = 422,141 \text{ кг/с}$$

Объемный расход истечения:

$$Q_{\text{ж}} = 422,141/415 = 1,0172 \text{ м}^3/\text{с}$$

Объем вышедшего сжиженного газа:

$$V_{\text{ж}} = 1,0172 \times 300 = 305,16 \text{ м}^3$$

Масса вышедшего газа:

$$m_{\text{ж}} = 305,16 \times 415 = 126642,4 \text{ кг}$$

При выбросе сжиженного газа из оборудования часть продукта за счет внутренней энергии мгновенно испаряется, образуя с капельками жидкости облако аэрозоля. Доля мгновенно испаряющейся жидкости:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{3450(38 - (-158))}{511875}\right) = 0,733$$

Оставшаяся часть жидкости образует пролив. Объем жидкости в проливе:

$$V_{\text{пр}} = (1 - 0,733) \times 305,16 = 81,436 \text{ м}^3$$

Максимальная площадь пролива для данного объема жидкости:

$$F_{\text{II}} = 5 \times 81,436 = 407,2 \text{ м}^2$$

Радиус круга, описывающего площадь горения, составляет 11,4 м.

Масса вылившейся жидкости:

$$m_{\text{пр}} = 81,436 \times 415 = 33796 \text{ кг}$$

Время испарения до появления источника зажигания: 3600 с.

Испарение жидкости с поверхности пролива происходит за счет потока тепла

от подстилающей поверхности. По мере охлаждения подстилающей поверхности интенсивность испарения уменьшается от  $1,52 \times 10^{-1}$  кг/(с·м<sup>2</sup>) в начале процесса до  $8,01 \times 10^{-3}$  кг/(с·м<sup>2</sup>) (при  $t_{и} = 3600$  с).

За 3600 с масса паров, образовавшихся с поверхности пролива, составит:

$$m_{п.пр} = 407,2 \times \int_0^{3600} \frac{(1,5 \times 2000 \times 2000)^{0,5} \times (20 - (-158))}{511875 \times (\pi \times t_{и})^{0,5}} dt_{и} = 22243,9 \text{ кг}$$

Общая масса паров составит:

$$m_{п} = 0,733 \times 422,141 \times 300 + 22243,9 = 115090,3 \text{ кг}$$

Трехмерная визуализация аварийной ситуации при разрушении магистрального трубопровода представлена на рисунке 3.57.

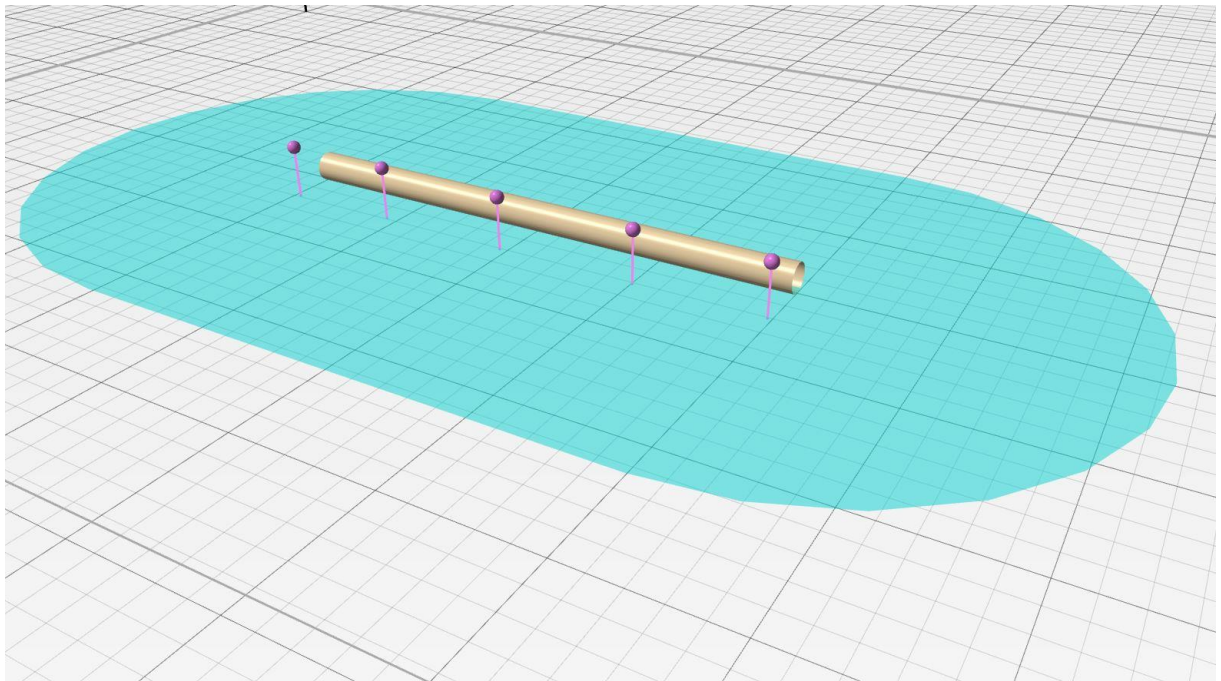


Рисунок 3.57 – Разрушение

### 3.5.4 Сценарий 1. Разгерметизация 20 мм, пожар пролива

Условная вероятность возникновения:

$$P = 0,995 \times 0,005 \times 0,9 = 0,0044775$$

Частота возникновения (3.34):

$$Q = Q_{\text{ав.с.}} \times P, \quad (3.34)$$

где  $Q_{\text{ав.с.}}$  – частота реализации в течение года сценария пожара,  $\text{год}^{-1}$ .

$$Q = 2,809 \times 10^{-6} \times 0,0044775 = 1,258 \times 10^{-8} \text{ год}^{-1}$$

Расчет теплового потока при штиле.

Ниже приведен расчет теплового потока для точки, расположенной на расстоянии 1,7 м от края пролива (края площади пожара).

Площадь пожара:  $F_{\text{П}} = 0,1 \text{ м}^2$ .

Эффективный диаметр площади пожара (3.35):

$$d = \sqrt{\frac{4 \times F_{\text{П}}}{\pi}}, \quad (3.35)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0,1}{\pi}} = 0,4 \text{ м}$$

Параметр  $u_*$  определяется по формуле (3.36):

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \times g \times d^3}{\rho_{\text{П}}}}} \quad (3.36)$$

где  $w_0$  – скорость ветра, м/с

$m'$  – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>);

$d$  – эффективный диаметр пролива, м;

$\rho_{\text{П}}$  – плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>;

$$u_* = \frac{0}{\sqrt[3]{\frac{0,08 \times 9,81 \times 0,4^3}{2,28}}} = 0$$

При  $u_* < 1$  принимается:  $\cos\theta = 1$ ;  $\sin\theta = 0$ .

Длина пламени (3.37):

$$L = 42 \times d \times \left( \frac{m'}{\rho_a \times \sqrt{g \times d}} \right)^{0,61}, \quad (3.37)$$

где  $\rho_a$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

$$L = 42 \times 0,4 \times \left( \frac{0,08}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 0,4}} \right)^{0,61} = 2,3 \text{ м}$$

Расстояние от геометрического центра пожара до облучаемого объекта (3.38):

$$X = r + 0,5 \times d, \quad (3.38)$$

где  $r$  – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

$$X = 1,7 + 0,5 \times 0,4 = 1,9 \text{ м}$$

Расчетные величины  $a$ ,  $b$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  определяются по формулам (3.39-3.43):

$$a = \frac{2L}{d}, \quad (3.39)$$

$$a = \frac{2 \times 2,3}{0,4} = 10,78$$

$$b = \frac{2X}{d}, \quad (3.40)$$

$$b = \frac{2 \times 1,9}{0,4} = 9$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b + 1)^2 - 2a(b + 1) \times \sin\theta}, \quad (3.41)$$

$$A = \sqrt{10,78^2 + (9 + 1)^2 - 2 \times 10,78 \times (9 + 1) \times 0} = 14,71$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b - 1)^2 - 2a(b - 1) \times \sin\theta}, \quad (3.42)$$

$$B = \sqrt{10,78^2 + (9 - 1)^2 - 2 \times 10,78 \times (9 - 1) \times 0} = 13,43$$

$$C = \sqrt{1 + (b^2 - 1) \times \cos^2\theta}, \quad (3.43)$$



$$C = \sqrt{1 + (9^2 - 1) \times 1^2} = 9$$

Фактор облученности для вертикальной площадки (3.44):

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -E \times \arctan D + E \times \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \times b \times (1 + a \times \sin \theta)}{A \times B} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan \left( \frac{A \times D}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \times \left[ \arctan \left( \frac{a \times b - F^2 \times \sin \theta}{F \times C} \right) + \arctan \left( \frac{F^2 \times \sin \theta}{F \times C} \right) \right] \right\}, \quad (3.44)$$

где  $D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}}, E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}, F = \sqrt{b^2 - 1}.$

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -1,2 \times \arctan(0,89) + 1,2 \times \left[ \frac{10,78^2 + (9+1)^2 - 2 \times 9 \times (1 + 10,78 \times 0)}{14,71 \times 13,43} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan \left( \frac{14,71 \times 0,89}{13,43} \right) + \frac{1}{9} \times \left[ \arctan \left( \frac{10,78 \times 9 - 8,95^2 \times 0}{8,95 \times 9} \right) + \arctan \left( \frac{8,95^2 \times 0}{8,95 \times 9} \right) \right] \right\} = \\ = 0,05$$

Фактор облученности для горизонтальной площадки (3.45):

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \times \left[ \arctan \left( \frac{a \times b - F^2 \times \sin \theta}{F \times C} \right) + \arctan \left( \frac{F^2 \times \sin \theta}{F \times C} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \times b \times (1 + a \times \sin \theta)}{A \times B} \right] \times \arctan \left( \frac{A \times D}{B} \right) \right\}, \quad (3.45)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan \left( \frac{1}{0,89} \right) + \frac{0}{9} \times \left[ \arctan \left( \frac{10,78 \times 9 - 8,95^2 \times 0}{8,95 \times 9} \right) + \arctan \left( \frac{8,95^2 \times 0}{8,95 \times 9} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{10,78^2 + (9+1)^2 - 2 \times 9 \times (1 + 10,78 \times 0)}{14,71 \times 13,43} \right] \times \arctan \left( \frac{14,71 \times 0,89}{13,43} \right) \right\} = \\ = 0,022$$

Угловой коэффициент облученности (3.46):

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (3.46)$$

$$F_q = \sqrt{0,05^2 + 0,022^2} = 0,054$$

Коэффициент пропускания атмосферы (3.47):

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (X - 0,5 \times d)), \quad (3.47)$$

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (1,9 - 0,5 \times 0,4)) = 0,999$$

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени принимается по таблице П 3.4 [96] и при  $d = 0,4$  м составляет 220 кВт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность теплового излучения (3.48):

$$q = E_f \times F_q \times \tau, \quad (3.48)$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;

$F_q$  – угловой коэффициент облученности.

$$q = 220 \times 0,054 \times 0,999 = 11,96 \text{ кВт/м}^2$$

Аналогично были получены величины плотности теплового потока на различных расстояниях от края пролива (края площади пожара).

Расчет теплового потока при ветре 4 м/с.

Ниже приведен расчет теплового потока для точки, расположенной на расстоянии 5,7 м от края пролива (края площади пожара) с подветренной стороны от очага пожара (значения теплового потока для точек, расположенных с наветренной стороны, принимаются равными соответствующим значениям при штиле).

Площадь пожара:  $F_{\Pi} = 0,1 \text{ м}^2$ .

Эффективный диаметр площади пожара:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0,1}{\pi}} = 0,4 \text{ м}$$

Параметр  $u_*$ :

$$u_* = \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{0,08 \times 9,81 \times 0,4}{2,28}}} = 7,62$$

При  $u_* \geq 1$  принимается:

$$\cos\theta = u_*^{-0,5} = 7,62^{-0,5} = 0,362,$$

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} = \sqrt{1 - 0,362^2} = 0,932$$

Длина пламени (3.49):

$$L = 55 \times d \times \left( \frac{m'}{\rho_a \times \sqrt{g \times d}} \right)^{0,67} \times u_*^{0,21}, \quad (3.49)$$

$$L = 55 \times 0,4 \times \left( \frac{0,08}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 0,4}} \right)^{0,67} \times 7,62^{0,21} = 3,7 \text{ м}$$

Расстояние от геометрического центра пожара до облучаемого объекта:

$$X = 5,7 + 0,5 \times 0,4 = 5,9 \text{ м}$$

Расчетные величины:

$$a = \frac{2 \times 3,7}{0,4} = 17,67,$$

$$b = \frac{2 \times 5,9}{0,4} = 28,17,$$

$$A = \sqrt{17,67^2 + (28,17 + 1)^2 - 2 \times 17,67 \times (28,17 + 1) \times 0,932} = 14,22,$$

$$B = \sqrt{17,67^2 + (28,17 - 1)^2 - 2 \times 17,67 \times (28,17 - 1) \times 0,932} = 12,46,$$

$$C = \sqrt{1 + (28,17^2 - 1) \times 0,362^2} = 10,24$$

Фактор облученности для вертикальной площадки:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -0,55 \times \arctan(0,97) + 0,55 \times \left[ \frac{17,67^2 + (28,17 + 1)^2 - 2 \times 28,17 \times (1 + 17,67 \times 0,932)}{14,22 \times 12,46} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan\left(\frac{14,22 \times 0,97}{12,46}\right) + \frac{0,362}{10,24} \times \left[ \arctan\left(\frac{17,67 \times 28,17 - 28,15^2 \times 0,932}{28,15 \times 10,24}\right) + \arctan\left(\frac{28,15^2 \times 0,932}{28,15 \times 10,24}\right) \right] \right\} = \\ = 0,018$$

Фактор облученности для горизонтальной площадки:

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan\left(\frac{1}{0,97}\right) + \frac{0,932}{10,24} \times \left[ \arctan\left(\frac{17,67 \times 28,17 - 28,15^2 \times 0,932}{28,15 \times 10,24}\right) + \arctan\left(\frac{28,15^2 \times 0,932}{28,15 \times 10,24}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{17,67^2 + (28,17 + 1)^2 - 2 \times 28,17 \times (1 + 17,67 \times 0,932)}{14,22 \times 12,46} \right] \times \arctan\left(\frac{14,22 \times 0,97}{12,46}\right) \right\} = \\ = 0,071$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \sqrt{0,018^2 + 0,071^2} = 0,074$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (5,9 - 0,5 \times 0,4)) = 0,996$$

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени принимается по таблице ПЗ.4 [96] и при  $d = 0,4$  м составляет 220 кВт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность теплового излучения:

$$q = 220 \times 0,074 \times 0,996 = 16,12 \text{ кВт/м}^2$$

Аналогично были получены величины плотности теплового потока на различных расстояниях от края пролива (края площади пожара) (рисунок 3.58).

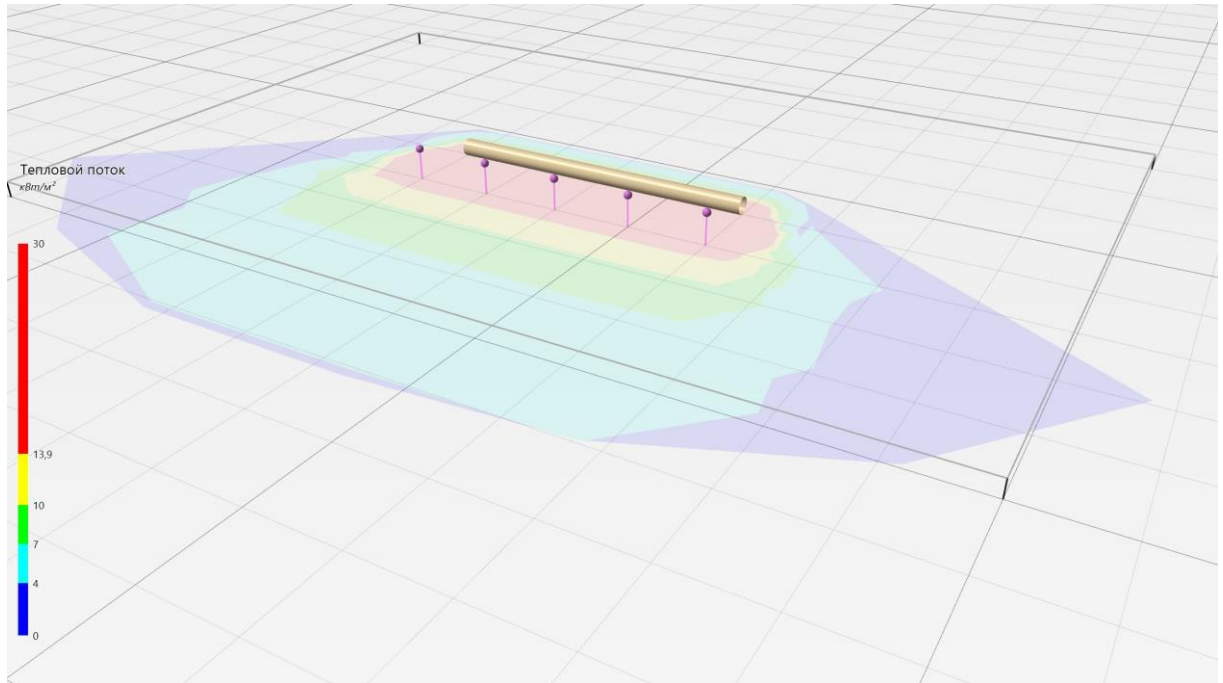


Рисунок 3.58 – Поле величин теплового потока при разгерметизации 20 мм

На рисунке 3.59 представлены зависимости теплового потока от расстояния от края пролива (пожара) при всех заданных вариантах силы ветра.

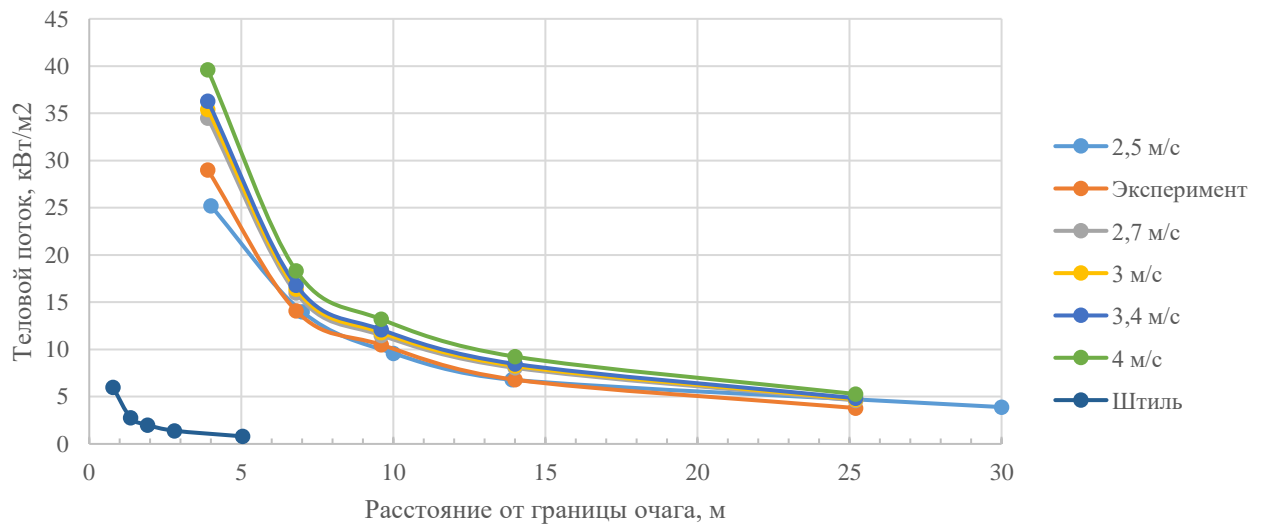


Рисунок 3.59 – Значения теплового потока при различной силе ветра для разгерметизации 20 мм

Анализируя данные графика 3.5.5 можно сделать вывод, что расхождение между расчетными величинами теплового потока при разгерметизации трубопровода (20 мм) для значения скорости ветра 2,5 м/с схожи с данными, полученными экспериментальным путем. Максимальное расхождение составило 4,84 %, что говорит о корректности поставленного эксперимента.

### 3.5.5 Сценарий 2. Разгерметизация 110 мм, пожар пролива

Условная вероятность возникновения:

$$P = 0,965 \times 0,036 \times 0,9 = 0,031266$$

Частота возникновения:

$$Q = 3,113 \times 10^{-6} \times 0,031266 = 9,732 \times 10^{-8} \text{ год}^{-1}$$

Расчет теплового потока при штиле.

Ниже приведен расчет теплового потока для точки, расположенной на расстоянии 3,9 м от края пролива (края площади пожара).

Площадь пожара:  $F_{\Pi} = 4,2 \text{ м}^2$ .

Эффективный диаметр площади пожара:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 4,2}{\pi}} = 2,3 \text{ м}$$

Параметр  $u_*$ :

$$u_* = \frac{0}{\sqrt[3]{\frac{0,08 \times 9,81 \times 2,3}{2,28}}} = 0$$

При  $u_* < 1$  принимается  $\cos\theta = 1$ ;  $\sin\theta = 0$ .

Длина пламени :

$$L = 42 \times 2,3 \times \left( \frac{0,08}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 2,3}} \right)^{0,61} = 7,4 \text{ м}$$

Расстояние от геометрического центра пожара до облучаемого объекта составит:

$$X = 3,9 + 0,5 \times 2,3 = 5,1 \text{ м}$$

Расчетные величины:

$$a = \frac{2 \times 7,4}{2,3} = 6,41,$$

$$b = \frac{2 \times 5,1}{2,3} = 4,39,$$

$$A = \sqrt{6,41^2 + (4,39 + 1)^2 - 2 \times 6,41 \times (4,39 + 1) \times 0} = 8,38,$$

$$B = \sqrt{6,41^2 + (4,39 - 1)^2 - 2 \times 6,41 \times (4,39 - 1) \times 0} = 7,25,$$

$$C = \sqrt{1 + (4,39^2 - 1) \times 1^2} = 4,39.$$

Фактор облученности для вертикальной площадки:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -1,46 \times \arctan(0,79) + 1,46 \times \left[ \frac{6,41^2 + (4,39 + 1)^2 - 2 \times 6,41 \times (4,39 + 1) \times 0}{8,38 \times 7,25} \right] \times \arctan\left(\frac{8,38 \times 0,79}{7,25}\right) + \frac{1}{4,39} \times \left[ \arctan\left(\frac{6,41 \times 4,39 - 4,28^2 \times 0}{4,28 \times 4,39}\right) + \arctan\left(\frac{4,28^2 \times 0}{4,28 \times 4,39}\right) \right] \right\} = 0,108$$

Фактор облученности для горизонтальной площадки:

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan\left(\frac{1}{0,79}\right) + \frac{0}{4,39} \times \left[ \arctan\left(\frac{6,41 \times 4,39 - 4,28^2 \times 0}{4,28 \times 4,39}\right) + \arctan\left(\frac{4,28^2 \times 0}{4,28 \times 4,39}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{6,41^2 + (4,39 + 1)^2 - 2 \times 4,39 \times (1 + 6,41 \times 0)}{8,38 \times 7,25} \right] \times \arctan\left(\frac{8,38 \times 0,79}{7,25}\right) \right\} = \\ = 0,056$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \sqrt{0,108^2 + 0,056^2} = 0,121$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (5,1 - 0,5 \times 2,3)) = 0,997$$

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени принимается по таблице ПЗ.4 [96] и при  $d = 2,3$  м составляет 220 кВт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность теплового излучения :

$$q = 220 \times 0,121 \times 0,997 = 26,61 \text{ кВт/м}^2$$

Аналогично были получены величины плотности теплового потока на различных расстояниях от края пролива (края площади пожара).

Расчет теплового потока при ветре 4 м/с.

Ниже приведен расчет теплового потока для точки, расположенной на расстоянии 17,5 м от края пролива (края площади пожара) с подветренной стороны от очага пожара (значения теплового потока для точек, расположенных с наветренной стороны от очага пожара, принимаются равными соответствующим значениям при штиле).

Площадь пожара:  $F_{\Pi} = 4,2 \text{ м}^2$ .

Эффективный диаметр площади пожара:



$$d = \sqrt{\frac{4 \times 4,2}{\pi}} = 2,3 \text{ м}$$

Параметр  $u_*$ :

$$u_* = \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{0,08 \times 9,81 \times 2,3}{2,28}}} = 4,32$$

При  $u_* \geq 1$  принимается:

$$\cos\theta = u_*^{-0,5} = 4,32^{-0,5} = 0,481,$$

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} = \sqrt{1 - 0,481^2} = 0,877$$

Длина пламени:

$$L = 55 \times 2,3 \times \left( \frac{0,08}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 2,3}} \right)^{0,67} \times 4,32^{0,21} = 10,2 \text{ м}$$

Расстояние от геометрического центра пожара до облучаемого объекта:

$$X = 17,5 + 0,5 \times 2,3 = 18,6 \text{ м}$$

Расчетные величины:

$$a = \frac{2 \times 10,2}{2,3} = 8,86,$$

$$b = \frac{2 \times 18,6}{2,3} = 16,16,$$

$$A = \sqrt{8,86^2 + (16,16 + 1)^2 - 2 \times 8,86 \times (16,16 + 1) \times 0,877} = 10,31,$$

$$B = \sqrt{8,86^2 + (16,16 - 1)^2 - 2 \times 8,86 \times (16,16 - 1) \times 0,877} = 8,53,$$

$$C = \sqrt{1 + (16,16^2 - 1) \times 0,481^2} = 7,82.$$

Фактор облученности для вертикальной площадки (3.5.5.19):

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -0,51 \times \arctan(0,94) + 0,51 \times \left[ \frac{8,86^2 + (16,16+1)^2 - 2 \times 16,16 \times (1+8,86 \times 0,877)}{10,31 \times 8,53} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan\left(\frac{10,31 \times 0,94}{8,53}\right) + \frac{0,481}{7,82} \times \left[ \arctan\left(\frac{8,86 \times 16,16 - 16,12^2 \times 0,877}{16,12 \times 7,82}\right) + \arctan\left(\frac{16,12^2 \times 0,877}{16,12 \times 7,82}\right) \right] \right\} = \\ = 0,027$$

Фактор облученности для горизонтальной площадки:

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan\left(\frac{1}{0,94}\right) + \frac{0,877}{7,82} \times \left[ \arctan\left(\frac{8,86 \times 16,16 - 16,12^2 \times 0,877}{16,12 \times 7,82}\right) + \arctan\left(\frac{16,12^2 \times 0,877}{16,12 \times 7,82}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{8,86^2 + (16,16+1)^2 - 2 \times 16,16 \times (1+8,86 \times 0,877)}{10,31 \times 8,53} \right] \times \arctan\left(\frac{10,31 \times 0,94}{8,53}\right) \right\} = \\ = 0,085$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \sqrt{0,027^2 + 0,085^2} = 0,089$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (18,6 - 0,5 \times 2,3)) = 0,988$$

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени принимается по таблице ПЗ.4 [96] и при  $d = 2,3$  м составляет 220 кВт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность теплового излучения:

$$q = 220 \times 0,089 \times 0,988 = 19,32 \text{ кВт/м}^2$$

Величина плотности теплового потока при следующих заданных условиях (скорость ветра, расстояние) представлена на рисунке 3.60.

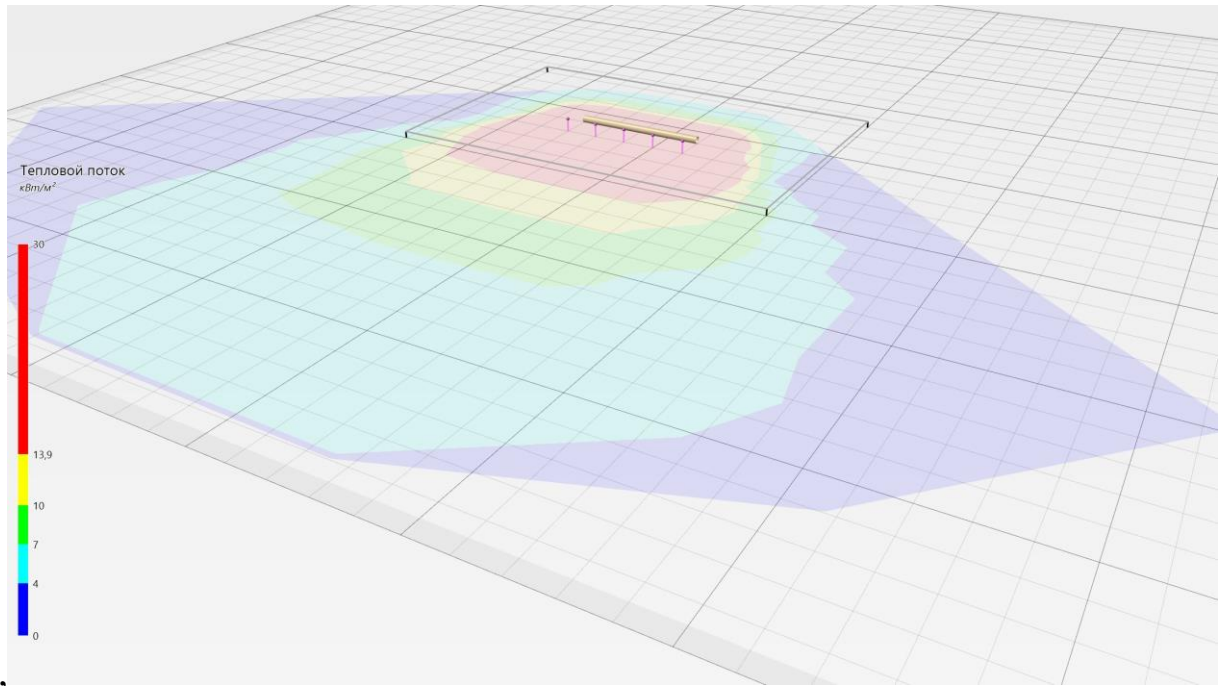


Рисунок 3.60 – Поле величин теплового потока при разгерметизации 20 мм

На рисунке 3.61 представлены зависимости теплового потока от расстояния от края пролива (пожара) при всех заданных вариантах силы ветра.

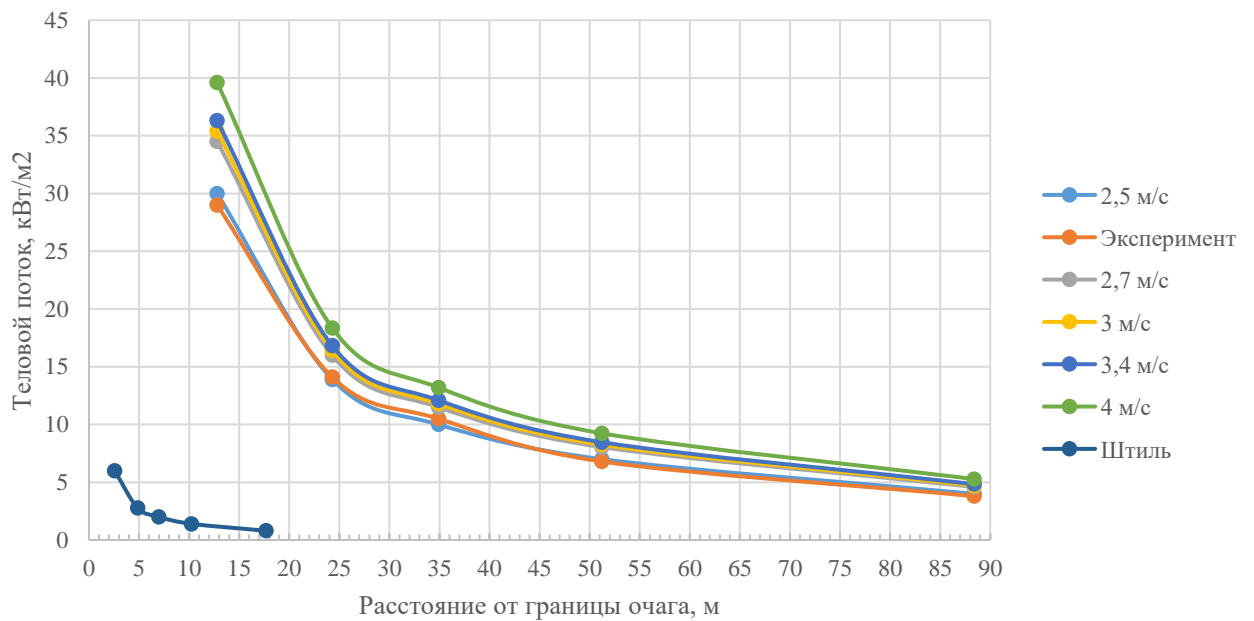


Рисунок 3.61 – Значения теплового потока при различной силе ветра для разгерметизации 110 мм

Как наглядно видно из графика 3.61 расхождение между расчетными

величинами теплового потока при разгерметизации трубопровода (110 мм) для значения скорости ветра 2,5 м/с схожи с данными, полученными экспериментальным путем. Максимальное расхождение составило 4,77 %, что говорит о корректности поставленного эксперимента.

### 3.5.6 Сценарий 3. Разрушение, пожар пролива

Условная вероятность возникновения:

$$P = 0,8 \times 0,24 \times 0,9 = 0,1728$$

Частота возникновения:

$$Q = 1,133 \times 10^{-6} \times 0,1728 = 1,958 \times 10^{-7} \text{ год}^{-1}$$

Расчет теплового потока при штиле.

Ниже приведен расчет теплового потока для точки, расположенной на расстоянии 18,3 м от края пролива (края площади пожара).

Площадь пожара:  $F_{\Pi} = 416,7 \text{ м}^2$ .

Эффективный диаметр площади пожара:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 416,7}{\pi}} = 23 \text{ м}$$

Параметр  $u_*$ :

$$u_* = \frac{0}{\sqrt[3]{\frac{0,08 \times 9,81 \times 23}{2,28}}} = 0$$

При  $u_* < 1$  принимается:  $\cos\theta = 1$ ;  $\sin\theta = 0$ .

Длина пламени:

$$L = 42 \times 23 \times \left( \frac{0,08}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 23}} \right)^{0,61} = 36,6 \text{ м}$$

Расстояние от геометрического центра пожара до облучаемого объекта:

$$X = 18,3 + 0,5 \times 23 = 29,8 \text{ м}$$

Расчетные величины:

$$a = \frac{2 \times 36,6}{23} = 3,18,$$

$$b = \frac{2 \times 29,8}{23} = 2,59,$$

$$A = \sqrt{3,18^2 + (2,59 + 1)^2 - 2 \times 3,18 \times (2,59 + 1) \times 0} = 4,79,$$

$$B = \sqrt{3,18^2 + (2,59 - 1)^2 - 2 \times 3,18 \times (2,59 - 1) \times 0} = 3,55,$$

$$C = \sqrt{1 + (2,59^2 - 1) \times 1^2} = 2,59.$$

Фактор облученности для вертикальной площадки:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -1,23 \times \arctan(0,67) + 1,23 \times \left[ \frac{3,18^2 + (2,59+1)^2 - 2 \times 2,59 \times (1+3,18 \times 0)}{4,79 \times 3,55} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan\left(\frac{4,79 \times 0,67}{3,55}\right) + \frac{1}{2,59} \times \left[ \arctan\left(\frac{3,18 \times 2,59 - 2,39^2 \times 0}{2,39 \times 2,59}\right) + \arctan\left(\frac{2,39^2 \times 0}{2,39 \times 2,59}\right) \right] \right\} = \\ = 0,183$$

Фактор облученности для горизонтальной площадки:

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan\left(\frac{1}{0,67}\right) + \frac{0}{2,59} \times \left[ \arctan\left(\frac{3,18 \times 2,59 - 2,39^2 \times 0}{2,39 \times 2,59}\right) + \arctan\left(\frac{2,39^2 \times 0}{2,39 \times 2,59}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{3,18^2 + (2,59 + 1)^2 - 2 \times 2,59 \times (1 + 3,18 \times 0)}{4,79 \times 3,55} \right] \times \arctan\left(\frac{4,79 \times 0,67}{3,55}\right) \right\} = \\ = 0,097$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \sqrt{0,183^2 + 0,097^2} = 0,207$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (29,8 - 0,5 \times 23)) = 0,987$$

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени принимается по таблице ПЗ.4 [96] и при  $d = 23$  м составляет 170,9 кВт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность теплового излучения:

$$q = 170,9 \times 0,207 \times 0,987 = 34,94 \text{ кВт/м}^2$$

Расчет теплового потока при ветре 4 м/с.

Ниже приведен расчет теплового потока для точки, расположенной на расстоянии 53,5 м от края пролива (края площади пожара) с подветренной стороны от очага пожара (значения теплового потока для точек, расположенных с наветренной стороны, принимаются равными соответствующим значениям при штиле).

Площадь пожара  $F_{\text{П}}$  составит 416,7 м<sup>2</sup>.

Эффективный диаметр площади пожара:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 416,7}{\pi}} = 23 \text{ м}$$

Параметр  $u_*$ :

$$u_* = \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{0,08 \times 9,81 \times 23}{2,28}}} = 2,01$$

При  $u_* \geq 1$  принимается:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= u_*^{-0,5} = 2,01^{-0,5} = 0,706, \\ \sin\theta &= \sqrt{1 - \cos^2\theta} = \sqrt{1 - 0,706^2} = 0,708. \end{aligned}$$

Длина пламени:

$$L = 55 \times 23 \times \left( \frac{0,08}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 23}} \right)^{0,67} \times 2,01^{0,21} = 40,2 \text{ м}$$

Расстояние от геометрического центра пожара до облучаемого объекта:

$$X = 53,5 + 0,5 \times 23 = 65 \text{ м}$$

Расчетные величины:

$$a = \frac{2 \times 40,2}{23} = 3,49,$$

$$b = \frac{2 \times 65}{23} = 5,64,$$

$$A = \sqrt{3,49^2 + (5,64 + 1)^2 - 2 \times 3,49 \times (5,64 + 1) \times 0,708} = 4,84,$$

$$B = \sqrt{3,49^2 + (5,64 - 1)^2 - 2 \times 3,49 \times (5,64 - 1) \times 0,708} = 3,28,$$

$$C = \sqrt{1 + (5,64^2 - 1) \times 0,706^2} = 4,05.$$

Фактор облученности для вертикальной площадки:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \times \left\{ -0,78 \times \arctan(0,84) + 0,78 \times \left[ \frac{3,49^2 + (5,64+1)^2 - 2 \times 5,64 \times (1+3,49 \times 0,708)}{4,84 \times 3,28} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan\left(\frac{4,84 \times 0,84}{3,28}\right) + \frac{0,706}{4,05} \times \left[ \arctan\left(\frac{3,49 \times 5,64 - 5,55^2 \times 0,708}{5,55 \times 4,05}\right) + \arctan\left(\frac{5,55^2 \times 0,708}{5,55 \times 4,05}\right) \right] \right\} = 0,102$$

Фактор облученности для горизонтальной площадки:

$$F_H = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \arctan\left(\frac{1}{0,84}\right) + \frac{0,708}{4,05} \times \left[ \arctan\left(\frac{3,49 \times 5,64 - 5,55^2 \times 0,708}{5,55 \times 4,05}\right) + \arctan\left(\frac{5,55^2 \times 0,708}{5,55 \times 4,05}\right) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \frac{3,49^2 + (5,64+1)^2 - 2 \times 5,64 \times (1+3,49 \times 0,708)}{4,84 \times 3,28} \right] \times \arctan\left(\frac{4,84 \times 0,84}{3,28}\right) \right\} = 0,137$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \sqrt{0,102^2 + 0,137^2} = 0,171$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (65 - 0,5 \times 23)) = 0,963$$

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени принимается по таблице ПЗ.4 [96] и при  $d = 23$  м составляет 170,9 кВт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность теплового излучения:

$$q = 170,9 \times 0,171 \times 0,963 = 28,08 \text{ кВт/м}^2$$

Аналогично были получены величины плотности теплового потока на различных расстояниях от края пролива (края площади пожара) (рисунок 3.62).



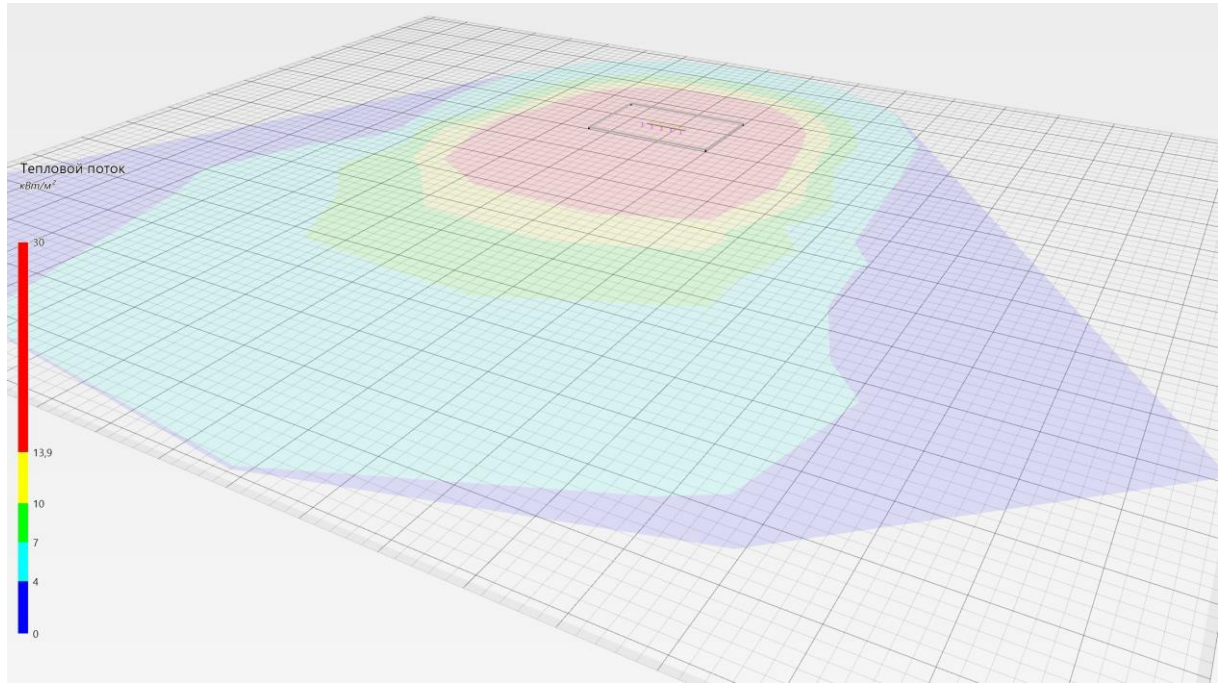


Рисунок 3.62 – Поле величин теплового потока при разрушении, пожаре пролива

На рисунке 3.63 представлены зависимости теплового потока от расстояния от края пролива (пожара) при всех заданных вариантах силы ветра.

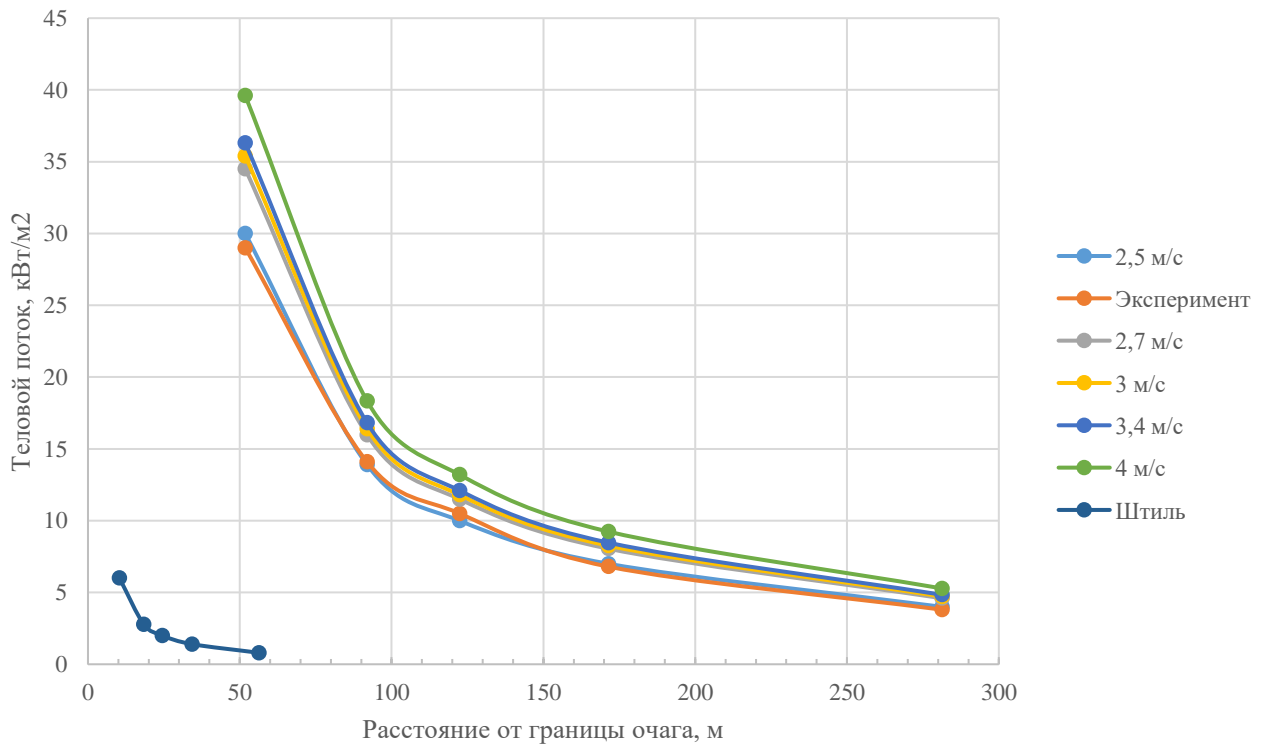


Рисунок 3.63 – Значения теплового потока при различной силе ветра разрушении пожара пролива

Как наглядно видно из графика 3.63 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.

### 3.6 Метод обработки экспериментальных исследований

Достоверность показаний прибора для определения мощности взрыва ГВС (теплового потока) оценивалось по соотношению десятикратного повторения эксперимента для каждого испытательного стенда при идентичных метеорологических условиях (температура окружающей среды, влажность воздуха, наличие и скорость ветра), идентичной концентрации ГВС и определении абсолютной и относительной погрешностей [1, 98]. С применением ЭВМ «Advanced Grapher» и «Excel» были вычислены среднее квадратичное отклонение, коэффициент корреляции, коэффициент регрессии и средняя погрешность аппроксимации. Результаты представлены в таблице 3.11.

По формуле (3.50) определены величины случайной ошибки результата измерения при  $n$  наблюдениях (за основу принят способ средней квадратичной ошибки).

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (3.50)$$

где  $n$  – число наблюдений;

$\bar{x}$  - среднее арифметическое значение показателя;

$x_i$ - результаты наблюдений.

Среднее значение каждого из показателя определяли по формуле (3.51) как среднее арифметическое из полученных результатов наблюдений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.51)$$

Абсолютная погрешность рассматриваемого прибора определена, как разность между средним арифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при отдельном наблюдении  $x_{от.набл.}$  по формуле (3.52):

$$\Delta x_i = \left| \bar{x} - x_{от.набл.} \right|, \quad (3.52)$$

Относительная погрешность определяется как отношение средней квадратичной ошибки к среднему арифметическому значению показателей (3.53):

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (3.53)$$

Для установления случайной ошибки необходимы данные в части доверительного интервала и величины доверительной вероятности, которая оценивает величину надежности полученных значений. При измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью  $\alpha=0,95$ , которой соответствует доверительный интервал в долях  $\omega=2,0$ . Для измерений показателей каждого наблюдения при соответствующей температуре испытания доверительный интервал  $\Delta \tau_x^-$  определяется по формуле (3.54):

$$\Delta \tau_x^- = S_n \cdot \omega, \quad (3.54)$$

Статистическая обработка результатов при десяти наблюдениях с указанием доверительного интервала представлена на рисунке 3.64.

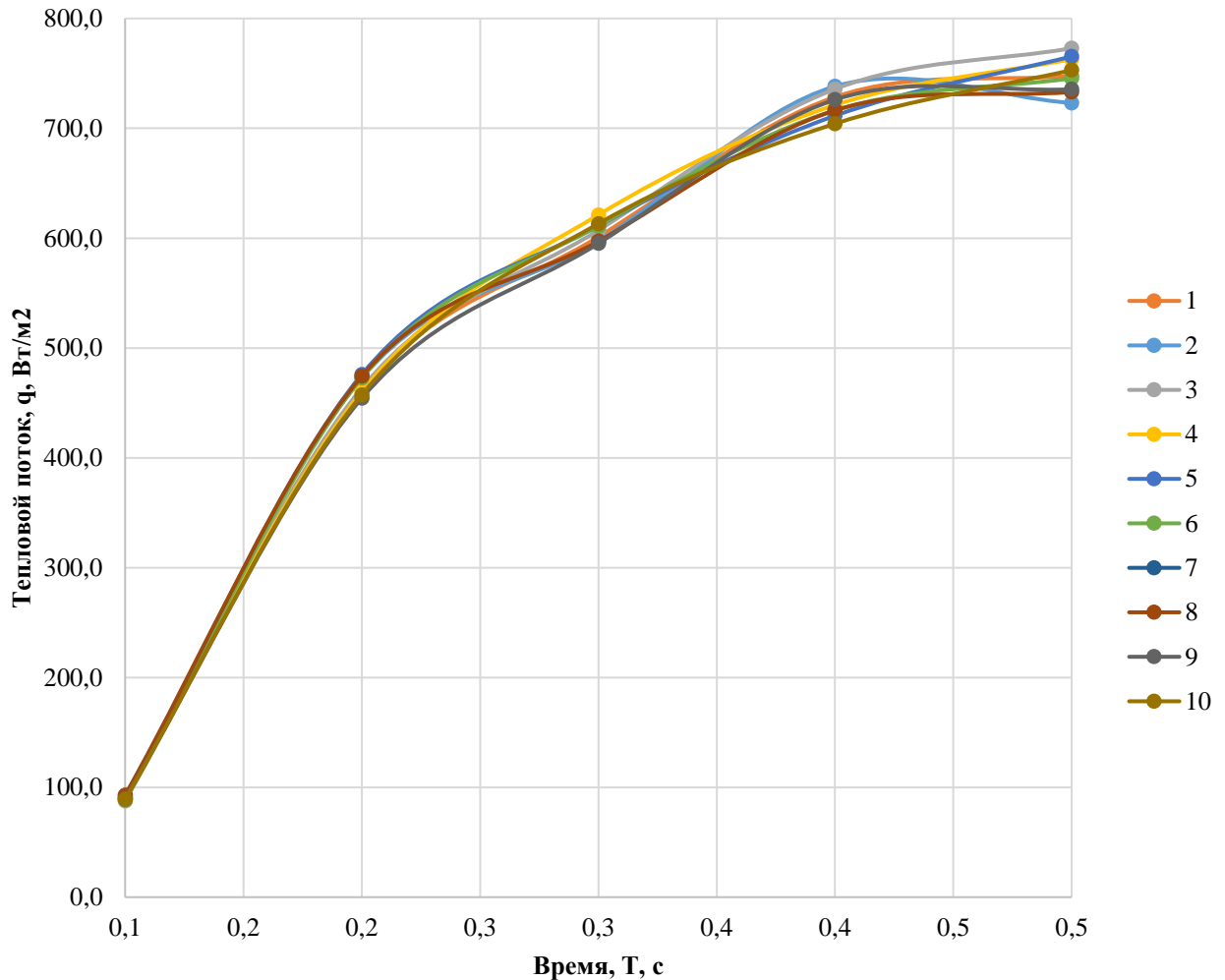


Рисунок 3.64 – Зависимости мощности теплового потока ГВС ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) от времени протекания процесса взрыва (количество повторений опыта – 10)

После статистической обработки результатов испытаний, полученные данные заносим в таблицу 3.11.

Таким образом, в доверительные интервалы будут укладываться 95 % результатов всех измерений. Значения средней относимой погрешности измерений и средняя погрешность аппроксимации не превышают 15 %.

Таблица 3.11 – Данные статической обработки и регрессионного анализа результатов взрыва ГВС при десятикратном повторении эксперимента.

Показатель	Мощность взрыва (теплового потока), Вт/м <sup>2</sup>					
	1	2	3	4	5	6
Временной интервал, с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
Опыт №1	90,30	461,94	601,15	728,49	748,02	
Опыт №2	89,40	458,86	597,14	735,78	757,99	
Опыт №3	91,50	465,02	605,16	752,77	743,03	
Опыт №4	89,70	471,18	617,18	745,49	735,55	
Опыт №5	93,31	448,08	595,14	706,64	733,06	
Опыт №6	88,49	449,62	587,12	718,78	757,99	
Опыт №7	88,80	468,10	599,15	752,77	772,95	
Опыт №8	91,50	451,16	591,13	752,77	755,50	
Опыт №9	87,89	471,18	587,12	711,49	728,07	
Опыт №10	88,80	454,24	607,16	740,63	762,98	
Среднее значение, $D, \bar{x}$	89,97	459,94	598,75	734,56	749,52	
Математическое ожидание, $E(X_i)$	89,97	459,94	598,75	734,56	749,51	
Дисперсия, $D(X_i)$	2,84	78,55	89,07	305,58	208,88	
Матрица корреляции, $\text{Corr}(X_i X_j)$	1,00	-0,43	0,10	0,00	-0,31	
	-0,43	1,00	0,40	0,28	-0,24	
	0,10	0,40	1,00	0,52	-0,02	
	0,00	0,28	0,52	1,00	0,52	
Медиана, $\text{Med}(X_i)$	89,55	460,40	598,15	738,21	751,76	
Мода, $\text{Mod}(X_i)$	91,50	471,18	587,12	752,77	757,99	
Дисперсия (разброс значений величины относительно её математического ожидания.)	2,85	78,53	89,05	305,64	208,89	
Доверительный интервал (95 %) a	88,92	454,44	592,90	723,73	740,56	
Доверительный интервал (95 %) b	91,01	465,43	604,59	745,40	758,47	
Доверительный интервал (99 %) a	88,60	452,72	591,06	720,32	737,74	

Окончание таблицы 3.11

1	2	3	4	5	6
Доверительный интервал (99 %) $b$	91,34	467,16	606,43	748,80	761,29
Приращение Длина доверительного интервала 95 %	6,75	35,45	37,75	69,93	57,81
Приращение Длина доверительного интервала 99 %	10,13	53,17	56,62	104,90	86,72
Среднее квадратическое отклонение, $\sigma(X_i)$	1,69	8,86	9,44	17,48	14,45

### 3.7 Выводы по главе

1. Проведен ряд практических эксперимента по контролю теплового потока при взрыве газовой смеси в условиях различных температур окружающей среды. Определены наиболее опасные значения концентрационных пределов взрываемости газовой смеси при отрицательных температурах окружающей среды.

2. Установлено, что под влиянием температур окружающей среды ниже минус 30°C мощность протекания взрыва ГВС увеличивается на 25-30% по сравнению с аналогичными процессами протекания при более высоких температурах.

3. Выполнено расчетное моделирование аварийной ситуации истечения ГВС в замкнутом объеме посредством программного комплекса PromRisk.

## **ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПРИБОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА, ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПГ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

### **4.1 Технология применения разработанного метода и прибора контроля для создания технических устройств обеспечения безопасности на объектах промышленного комплекса**

Разработанный датчик контроля теплового потока можно использовать для обнаружения пожара ПГ в составе новой автоматической системы раннего обнаружения [99-102].

Как правило для ликвидации горения ПГ применяется способ газопорошкового тушения [103]. Механизм тушения пламени связан с доставкой огнетушащего вещества непосредственно в зону реакции горения и диспергирования в пламя осколков микрокапсул. В результате огнетушащая эффективность повышается в 3-5 раз по сравнению с известными способами тушения пожаров. Увеличение огнетушащей эффективности связано не только с химическими свойствами применяемого вещества, но и с возможностью создания огнетушащей концентрации локально по объему, что повышает эффективность при тушении автоматическими системами пожаротушения. В качестве микрокапсул предложено использовать энергетические золы уноса, которые образуются в качестве отходов при сжигании углей на ТЭЦ. Они представляют собой полые шарообразные твердые частицы малого размера, имеющие микротрещины на своей поверхности. Сферическая форма с ее минимальным соотношением площади к объему означает, что достигается максимальный объем огнетушащего газа, проникающего за счет капиллярного эффекта во внутрь микрокапсулы. Твердость по Моосу 7 и принимаемая форма сферы являются условием для предотвращения



слеживания огнетушащего порошка. К тому же микрокапсула является идеальной для обеспечения текучести порошка. Она, вследствие своего инертного состава обладают высокой устойчивостью к целому ряду химических элементов, они не влияют на химический состав или реакции материалов и изделий после тушения пожара. (замена микрокапсул на – капсулы, данный тип АУПТ)

Была построена автоматическая система для раннего обнаружения пожара ПГ с использованием применения датчиков теплового потока [48, 104]. Тепловой поток ИК-излучения непрерывно контролируется устройством, имеющим опционально дополнительный канал для определения и регистрации флуктуации пламени. Электронная схема обрабатывает фильтрацию и усиление сигнала, а затем измеряет его и выдает в цифровом виде (интерфейс RS-485) на управляющий интеллектуальный модуль. Датчики распределяются следующим образом: весь объем защиты делится на оптические зоны, которые образуют пространственную координационную решетку. В алгоритм тушения пожара закладываются координаты каждой зоны.

Комплекс датчиков теплового потока, постоянно производит мониторинг защищаемого объема посредством непрерывного обмена данных между всеми приборами. Определение числовых значений величины теплового потока ( $\text{Вт/м}^2$ ), взятых с датчиков, позволяет определить местоположение очага теплового воздействия (это может быть аварийный выброс ПГ, разогрев или возгорание). В дальнейшем координаты пожара определяются путем математического анализа. В технических требованиях к ПО заложен алгоритм обнаружения пожара.

Мощную быстродействующую систему пожаровзрывоподавления возможно создать на базе пожарных роботов. Их алгоритм работы обеспечивает подачу соответствующего огнетушащего вещества на тушение возникающих пожаров с учетом их взаимного пространственного расположения. Высокую интенсивность подачи ОТВ в точку защиты и значительно высокое быстродействие осуществляют пожарные роботы. Абсолютно каждый лафетный ствол роботизированной установки пожаротушения снабжен своей уникальной адресацией. Принцип работы системы при реализации аварийной ситуации или непосредственно самого

возгорания осуществляется путем сработки необходимого числа РУП с их автоматической ориентацией в направлении очагов пожара.

Для обеспечения высокой интенсивности подачи ОТВ разработаны новые принципы импульсного пожаротушения. На основе лабораторных исследований и натурных испытаний по определению интенсивности подачи газопорошковых ОТВ с использованием импульсных технологий определены дальность подачи, оптимальные соотношения массы ОТВ к заряду, время поддержания огнетушащей концентрации, способы подачи огнетушащих микрокапсул и другие параметры необходимых параметров для создания облака ОТВ огнетушащей концентрации.

Революционные информационные технологии, основанные на применении одноплатных компьютеров, привели к созданию нового поколения автоматических систем обеспечения безопасности зданий и сооружений - умных систем безопасности. Данные технологии позволяют реализовать принципиально новые приемы контроля и управления системами защиты, основу которых составляет интеллект. Использование оборудования, массово выпускаемого различными предприятиями по стандарту РС104 привело к многократному снижению стоимости защиты объектов при повышении надежности.

Помимо непосредственно системы активного пожаротушения, разработанный прибор можно использовать в составе умных систем безопасности (далее УСБ). УСБ могут успешно сочетать 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, а возможности удаленного доступа позволяют не только получать любую динамическую информацию о состоянии объекта, но и при необходимости вмешиваться в управление.

Проектирование, монтаж и обслуживание таких систем безопасности не предполагает новых знаний и умений персонала, поэтому они могут внедряться без существенной переработки проектов и существующих систем. Такое оборудование широко серийно выпускается, поэтому элементы УСБ не только независимы от поставок конкретного производителя, но и имеют хорошую ремонтпригодность.

Наиболее перспективна защита системами УСБ распределенных объектов, характерных для предприятий добычи и переработки ПГ, так как возможность в удаленном доступе проводить необходимые наладки и переключения исключает необходимость присутствия специализированного обслуживающего персонала непосредственно на объекте защиты.

Таким образом, современные ИТ коренным образом меняют суть автоматизации инженерной защиты объектов добычи и переработки ПГ, представляя проектировщикам невиданные возможности по созданию алгоритмов обеспечения безопасности зданий. На передний план выходят функциональные потребности заказчика, опыт и знания профессионалов по пожарной, промышленной безопасности, а аппаратная часть не имеет существенного значения, также, как и производитель конкретного оборудования. Реализация указанных алгоритмов возможна при применении как открытых операционных систем и программных продуктов, так и новых специально разрабатываемых программных комплексов.

Немаловажно, что объединение в сети большого количества одноплатных компьютеров не только повышает живучесть зданий и сооружений, но и увеличивает вычислительные ресурсы, превращая УСБ в некий суперкомпьютер, позволяющий решать задачи мониторинга, прогноза развития пожаров, взрывов, аварий и других негативных явлений в режиме реального времени. Поэтому функциональные возможности активной защиты зданий и сооружений зависят только от интеллектуальных возможностей постановщиков задач и программистов, создающих специализированное программное обеспечение. Немаловажно, что в России элементы УСБ прошли многолетнюю промышленную эксплуатацию в составе традиционных систем.

#### **4.2 Технология применения разработанного датчика в качестве контроля взрыва газозвушной смеси в условиях низких температур**

Результаты исследования доказали высокий технологический уровень и экономическую обоснованность применения датчика контроля теплового потока для измерения величины теплового потока при взрыве ГВС в условиях низких температур. Применение ДКТП возможно как на открытой местности, так и в помещениях различного класса функционального назначения [105, 106]. Материалы работы могут быть использованы на объектах производства, хранения и транспортировки ПГ в условиях Севера.

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.

### **4.3 Выводы по главе**

1. Разработанный датчик контроля теплового потока можно использовать для обнаружения пожара ПГ в составе предложенной автоматической системе раннего обнаружения.
2. Проведена апробация применения датчика контроля теплового потока при взрывопроявлении (взрыве ПГ на разработанном экспериментальном стенде) в условиях неблагоприятных метеоусловий (тепловая инверсия, штиль, низкие температуры окружающей среды).
3. Работа позволила создать прибор (датчик контроля теплового потока), имеющий улучшенные характеристики по сравнению с аналогами, для уменьшения возможных рисков и аварийных ситуаций на действующем нефтегазовом производстве.

## 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 газозвушной 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 газозвушной смеси при различных температурах окружающей среды. Выявлены закономерности протекания взрыва при различных концентрациях газозвушной смеси, установлено влияние состояния окружающей среды на динамику взрыва.

2. Установлено, что под влиянием температур окружающей среды ниже минус 30°C мощность протекания взрыва ГВС увеличивается на 25-30% по сравнению с аналогичными процессами протекания при более высоких температурах.

3. Разработан метод контроля теплового потока при взрыве газозвушной смеси, позволяющий проводить исследования при разных температурах окружающей среды, в том числе при температурах ниже -30°C. Разработанный метод отличается простотой, высокой точностью измерения и погрешностью  $1 \pm 0,5\%$ .

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°C, 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, и при разработке умных систем безопасности, а также для уменьшения возможных рисков и снижения аварийности при функционировании объектов производства, хранения и транспортировки ПГ в условиях низких температур на действующих нефтегазовых комплексах.

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 повышение техногенной безопасности строений на нефтегазовых месторождениях северной территории Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисанов М.В., Савина А.В., Дегтярев Д.В., Самусева Е.А. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта / Безопасность труда в промышленности. - №7. - 2010. - с.16-22.
2. Годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: [http://www.gosnadzor.ru/osnovnaya\\_deyatelnost\\_otchety](http://www.gosnadzor.ru/osnovnaya_deyatelnost_otchety)
3. PHMSA Incidents Statistics — URL: <http://www.phmsa.dot.gov/hazmat/library/data-stats/incidents>.
4. 17th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group. — Groningem: EGIG, December, 2018.
5. 16th Report of the UKOPA Fault Database Management Group. — Loughborough: GL Industrial Services Ltd, December, 2019.
6. Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2017 and since 1971. — Brussels: CONCAWE, November, 2019.
7. Захарова, М.И. Анализ и оценка риска аварий резервуаров и газопроводов при низких температурах : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захарова Марина Ивановна ; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2015. – 140с.
8. Климатические параметры Восточно-Сибирского и Дальневосточного экономических районов : (научно-справочное пособие) / Л. Е. Анапольская и др. ; под ред. Л. Е. Анапольской, И. Д. Копанева ; Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1979. – 389 с.
9. Обеспечение пожарной безопасности объектов хранения и переработки СУГ : рекомендации : [утверждены главным Государственным

инспектором Российской Федерации по пожарному надзору письмом от 29.12.1997 г. № 20/3.2/2802]. – Москва, 1999. – 40 с.

10. Васильченко, Г.С. Критерий прочности тел с трещинами при квазихрупком разрушении материала / Г.С. Васильченко // Машиностроение. – 1978. – № 6. – С. 103-108.

11. Большаков, А.М. Вероятностные методы оценки хрупкого разрушения стальных конструкций / А. М. Большаков. – Якутск: Ин-т физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 2011. – 112 с.

12. Быков, А.А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы / А.А. Быков // Проблемы анализа риска. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 4-7.

13. Беляев, Б.Ф. Характеристики хрупкого разрушения в связи с конструктивными факторами / Б.Ф. Беляев, Н.А. Махутов, О.Н. Винклер // Проблемы прочности. – 1971. – №4. – С.27-31.

14. Большаков, А.М. Оценка вероятности хрупкого разрушения труб и сосудов большого диаметра по критериям механики разрушения : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Большаков Александр Михайлович ; Объединенный институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – Москва, 1999. – 117 с.

15. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 272 с.

16. Крехов, А.А. Взрыв газо-воздушной смеси при низких температурах / А.А. Крехов, А.В. Петров // Молодая нефть : материалы I Всерос. молодежной научн.-техн. конф. нефтегазовой отрасли (Красноярск, 17-19 мая 2014 года). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 119-127.

17. Большаков, А.М. Хладостойкость трубопроводов и резервуаров Севера после длительной эксплуатации : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Большаков Александр Михайлович ; Институт



машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – Москва, 2009. – 358 с.

18. Бобков, С.А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков. – Москва : Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с. – ISBN 978-5-9229-0084-3.

19. Рогов, Е.И. Теоретические принципы обоснования вероятностного критерия оценки взрывоопасности угольных пластов / Е.И. Рогов, П.В. Долгов // Совершенствование технологии добычи полезных ископаемых : материалы Республ. конф. молодых ученых и специалистов (Алма-Ата, 1979 год). – Алма-Ата : институт горного дела АН Каз. ССР, 1979. – С. 37-45.

20. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (с Изменением N 1) : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 1991-01-01 / Госстандарт СССР. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 135 с.

21. ГОСТ 12.1.010-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования (с Изменением N 1) : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 1978-01-01 / Госстандарт СССР. – Изд. официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 12 с.

22. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами / О. М. Волков. – Санкт-Петербург : Изд-во политехнического университета, 2010. – 397 с.

23. Козлитин, А.М. Стохастические модели и результаты количественной оценки интегрированного риска аварий на магистральном трубопроводном транспорте в условиях Заполярья / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин // Устойчивое экологическое развитие: региональные аспекты: Междунар. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 125-138.

24. Рыбнов, Ю.С. Экспериментальные исследования влияния приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности на амплитуду слабых воздушных ударных волн от наземных химических взрывов / Ю.С. Рыбнов, В.И. Кудрявцев, В.Ф. Евменов // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 6. – С. 98-100.

25. Таубкин, С.И. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки // С.И. Таубкин, И.С. Таубкин. – Москва : Химия, 1976. - 262 с.
26. Сидоренко, В.И. Развитие научных основ обеспечения безопасных условий труда в пожаровзрывоопасных производственных процессах и технологиях нефтегазовой и строительной промышленности : специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Вадим Иванович Сидоренко. – Владивосток, 2002. – 249 с.
27. Взрыв // Большая советская энциклопедия. – 3-е изд. – Москва, 1971. – Т. 5. – С. 10.
28. Российская Федерация. Правительство. О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска : постановление Правительства РФ от 31.03.2009 г. № 272. – Доступ из справочно-правовой системы Консультант Плюс.
29. Крехов, А.А. Исследование особенностей взрывов газовой смеси на промышленных предприятиях в условиях низких температур / А.А. Крехов, А.А. Дектерев // Прогрессивные технологии и процессы : материалы 2-й Международной молодежной научно-практической конференции (Курск, 26 сентября 2015 года). – Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2015. – С. 105-109.
30. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности» : [утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 июня 2016 г. № 272]. – Москва : ЗАО НТЦ ПБ, 2019. – Доступ из справочно-правовой системы Консультант Плюс.
31. Сафонов, В.С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В.С Сафонов, Г.Э. Одишария, А.А. Швыряев. – Москва : РАО «Газпром», 1996. - 208 с.
32. Большаков, А.М. Научно-технические основы риск-анализа объектов нефтехимии в арктической зоне / А.М. Большаков, М.И. Захарова // Химическое и

нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 36-39.

33. Dorsett, Henry G. Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts / Henry G. Dorsett. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1960. – 21 с.

34. Bartrnecht, W. Explosionen. Ablaut und schutzmaßnahmen / W. Bartrnecht. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1978. – 264 с.

35. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах: Серия 27. Выпуск 1 / Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, Ю.В. Лисин, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров. – 2-е изд., испр. – Москва : ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 120 с. – ISBN 5-93586-164-X.

36. Меньшиков, П.В. Факторы влияющие на интенсивность ударной воздушной волны / П.В. Меньшиков // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле : материалы научн.-техн. конф. (Екатеринбург, 12-14 октября 2011 года). – Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, 2011. – С. 246 - 255.

37. ГОСТ 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2014-01-01 / Росстандарт. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 125 с.

38. Имайкин, Г.А. Оценка взрывоопасности технологического оборудования методами теории надежности / Г.А. Имайкин // Химическая промышленность. – 1975. – №5. – с. 382-386.

39. Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности. – Москва: РАО «Газпром», 1996. – 209 с.

40. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий ; отв. ред. Р. И. Солоухин ; АН СССР, Ин-т хим. физики, Науч. совет по пробл. «Теорет. основы процессов горения». – 3-е

издание, исправленное и дополненное. – Москва : Наука, 1987. – 490 с.

41. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» : Приказ Ростехнадзора от 11.03.2013 г. № 96 (ред. от 26.11.2015 г.) : [Зарегистрировано в Минюсте России 16.04.2013 № 28138]. – Доступ из справочно-правовой системы Консультант Плюс.

42. Бесчастнов, М.В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов / М. В. Бесчастнов. – Москва : Химия, 1983. – 470 с.

43. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливо-воздушных смесей (РД 03–409-01) : Серия 27. Выпуск 2 / Колл. авт. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 224 с.

44. Махутов, Н.А. Возможные сценарии аварийных ситуаций на резервуарах и трубопроводах при низких температурах эксплуатации / Н.А. Махутов, А.М. Большаков, М.И. Захарова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, №3. – С. 49-53.

45. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : Справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 224 с.

46. Патент № RU 195452 U1 Российская Федерация, МПК G08B 17/113 (2006.01). Датчик контроля теплового потока : № 2019123250 : заявл. 18.07.2019 : опубл. 28.01.2020 / Крехов А.А., Клочков С.В., Минкин А.Н., Едимичев Д.А. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – 6 с. : ил.

47. Цейтлин, Я.И. Влияние метеоусловий на интенсивность слабых ударно-воздушных волн взрывов / Я.И. Цейтлин, М.И. Ганопольский, В.А. Громов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1980. – № 3. – С. 51-55.

48. Klochkov, S.V. Enhanced heat flow control sensor application for early fire detection / S.V. Klochkov, A.N. Minkin, S.N. Masaev, A.A. Krexov // ICMSIT-2020: metrological support of innovative technologies : I international scientific conference (Krasnoyarsk, 4 March 2020). – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2020
49. Бесчастнов, М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М. В. Бесчастнов. – Москва : Химия, 1991. – 430 с. – ISBN 5-7245-0820-6
50. Крехов, А.А. Разработка и совершенствование способов моделирования развития пожара и взрыва с учетом особенностей протекания процессов в условиях Крайнего Севера / А.А. Крехов, А.А. Дектерев // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3 (3). – С. 144-148.
51. Копельман, Л.А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению / Л. А. Копельман. – Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1978. – 230 с.
52. Захарова, М.И. Идентификация опасностей на газопроводах, работающих в условиях низких температур / М.И. Захарова, А.М. Большаков // Живучесть и конструкционное материаловедение : материалы Междунар. конф. (Москва, 22-24 октября 2012 года). – Москва : ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, 2012 – Т. 1. – С. 101-110.
53. Bolshakov, A.M. Scientific and Technical Bases of Risk Analysis for Petrochemistry Objects in the Arctic Zone / A.M. Bolshakov, M.I. Zakharova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – Vol. 50. Issue 5-6. – P. 396-401.
54. Серенсен, С.В. Определение критических температур хрупкости изделий из малоуглеродистой стали / С.В. Серенсен, Н.А. Махутов // Проблемы прочности. – 1969. - №4. – С.29-39.
55. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народно-хозяйственных, технических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций : в 2 частях – Москва : МГФ «Знание», 1998. – 448 с. – ISBN 5-87633-042-6
56. Козлитин, А.М. Развитие теории и методов оценки рисков для обеспечения промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса:

специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (нефтегазовая отрасль) : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Козлитин Анатолий Мефодьевич; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2006. – 395 с.

57. Маршалл, В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. / В. Маршалл. – Москва : Мир, 1989. – 672 с. – ISBN 5-03-000990-6.

58. Инверсии температуры над территорией СССР / Э. Ю. Безуглая, Е. В. Виноградова, Л. И. Елекоева и др. // Труды ГГО. – 1977. - Вып. 387. – С. 88—99.

59. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ : [принят Государственной Думой 4 июля 2008 года : одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. – Москва, 2008. – Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

60. ГОСТ 12.1.004-85. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования : национальный стандарт СССР : дата введения 1986-07-01 / Госстандарт СССР. – Изд. официальное. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 98 с.

61. Пожарные извещатели // Пожарная безопасность. энциклопедия. – Москва : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – С. 271-271.

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

63. Патент № RU 2168158 С2 Российская Федерация, МПК G01L 23/00(2006.01). Способ регистрации давления и перемещения ударной волны : № 96120625/28 : заявл. 20.12.1998 : опубл. 27.05.2001 / Гатилов Л.А. ; заявитель и патентообладатель Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Министерство Российской Федерации по атомной энергии. – 7 с. : ил.

64. Патент № RU 2537308 С2 Российская Федерация, МПК E21F 17/18(2006.01), G01L 23/00(2006.01). Способ регистрации и сохранения параметров

взрыва метанопылевоздушной смеси в горных выработках и устройство «черный ящик» для его осуществления (варианты) : № 2013116247/03 : заявл. 09.04.2013 : опубл. 27.12.2014 / Адамидзе Д.И, Горлов А.Ю., Горлов К.В., Горлов Ю.В., Джигрин А.В. ; заявитель и патентообладатель ЗАО «Межведомственная комиссия по взрывному делу» при Академии горных наук. – 16 с. : ил.

65. Патент № RU 2265198 С2 Российская Федерация, МПК G01L 5/00(2006.01), G01L 23/00(2006.01). Способ измерения параметров ударной волны : № 2003127959/2 : заявл. 16.03.2003 : опубл. 27.11.2005 / Толстиков И.Г., Комиссаров В.В., Жерноклетов М.В., Фомченко В.Н., Погодин Е.П. ; заявитель и патентообладатель ФГУП РФЯЦ – ВНИИЭФ, Министерство Российской Федерации по атомной энергии - Минатом РФ. – 8 с. : ил.

66. Патент SU 934792 А1 СССР, МПК G01L 23/00(2006.01). Способ измерения параметров ударной волны : № 2975027 : заявл. 19.08.1980 : опубл. 15.06.1993 / Иванов А.Г., Огородников В.А. – 2 с. : ил.

67. Взрывные явления. Оценка и последствия : в 2 кн. / [У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др.] ; пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. - Москва : Мир, 1986. – 382 с.

68. Teodorczyk, A. Fast deflagrations, deflagration-to-detonation transition (DDT) and direct detonation initiation in hydrogen-air mixtures / A. Teodorczyk. – URL: <http://ukelg.ps.ic.ac.uk/39AT.pdf> (дата обращения 18.02.2017).

69. Schmitt, R.G. Detonation properties of gases at elevated initial pressures / R.G. Schmitt, P.V. Butler // *Combust. Sci. Technol.* – 1995. – Vol. 106. – P. 167-193.

70. Westbrook, C.K. Chemical kinetics of hydrocarbon oxidation in gaseous detonations / C.K. Westbrook // *Combust. Flame.* – 1982. – Vol. 46. – P. 191-210.

71. Бабурин, А.В. Параметры взрывного горения пропан-бутановых смесей в окислительной среде кислорода и диоксида углерода / А.В. Бабурин, И.Р. Бегишев // *Технологии техносферной безопасности.* – 2014 – №3. – С. 5-10.

72. Счетчики газа диафрагменные ВК-G1.6. Паспорт устройства. – Москва : ООО «ЭЛЬСТЕР Газэлектроника». – 4 с.

73. Testo 925 - 1-канальный термометр. Руководство пользователя. –

Москва : ООО «Тесто Рус». – 19 с.

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

75. Минкин, А.Н. Определение расчётной величины пожарного риска противорадиационного укрытия / А.Н. Минкин, С.В. Ключков, А.А. Крехов, М.В. Елфимова // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : материалы VIII Всеросс. науч.-практ. конф. (с международным участием) (Железногорск, 26 октября 2018 года). – Железногорск, 2018. – С. 64-67.

76. Борисов, В.М. О приближенной оценке радиационных характеристик газозвеси металлических частиц / В.М. Борисов, А.А. Андриенко, В.Н. Будников, С.А. Кабиров // Проблемы технологического горения : материалы II Всесоюзной конференции по технологическому горению. –Черноголовка, 1978. – С. 165-166.

77. Скоростная поворотная IP-видеокамера с поддержкой кодека H.265 и ИК-подсветкой DC-S3883HRX. Руководство пользователя. – Москва : IDIS Russia. – 8 с.

78. Поршневой компрессор с прямым приводом Garage РК 24.F185/1.1. Инструкция по эксплуатации. – Москва : Garage. – 34 с.

79. rp5.ru : расписание погоды : сайт. – Москва. – URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения 30.09.2020).

80. Патент № RU 45544 U1 Российская Федерация, МПК G08B 19/00(2000.01). Широкообзорный датчик излучения : № 2004124186/22 : заявл. 10.08.2004 : опубл. 10.05.2005 / Амельчугов С.П., Коротков Ю.А., Горностаев Р.В., Шайдуров Г.Я., Гондарев В.В., Лукьянчиков В.Н. ; заявитель и патентообладатель ООО НТЦ «Системы пожарной безопасности», ООО НПФ «Фаза». – 10 с. : ил.

81. Патент № RU 2289850 C2 Российская Федерация, МПК G08B 17/12(2006.01). Датчик-извещатель инфракрасного излучения : № 2004105359/09 : заявл. 24.02.2004 : опубл. 20.12.2006 / Шайдуров Г.Я., Гондарев В.В., Лукьянчиков В.Н., Амельчугов С.П., Горностаев Р.В., Васильев С.А. ; заявитель и



патентообладатель ООО НТЦ «Системы пожарной безопасности», ООО НПФ «Фаза». – 6 с. : ил.

82. ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, 3) : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2014-01-01 / Росстандарт. – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 236 с.

83. ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89) Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP) : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 1997-01-01 / Госстандарт России. – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 65 с.

84. Сертификат соответствия С-RU.ПБ21.В.00584 на датчик контроля теплового потока ДКТП : дата начала действия 2015-11-23 / ОС «СибТест» ООО «ЦПЭ». – URL: [http://reestrinform.ru/reestr-sertifikatov-sootvetstviia/id7-reg\\_number-S-RU.ПБ21.В.00584.html](http://reestrinform.ru/reestr-sertifikatov-sootvetstviia/id7-reg_number-S-RU.ПБ21.В.00584.html) (дата обращения 11.07.2016).

85. Скамья оптическая ОСК-2ЦЛ. Паспорт АЛ2.766.259 ПС. – Новосибирск : ОАО «Швабе – Оборона и Защита». – 63 с.

86. Люксметр Testo 545. Руководство пользователя. – Москва : ООО «Тесто Рус». – 24 с.

87. Фотолампа // Фотокинотехника: Энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1981. – 447 с.

88. Тепловизор ТН9100MR/WR. Руководство по эксплуатации. – Москва : NEC San-ei Instrument, Ltd. – 231 с.

89. Гражданкин, А.И. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов / А. И. Гражданкин, П. Г. Белов // Безопасность труда в промышленности. – 2000. - № 11. - С.6 - 10.

90. Козлитин, А.М. Алгоритм расчета интегрированного риска потенциально опасных объектов техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов. – Саратов: Саратовское региональное отделение РЭА, 2000. – 56 с.

91. Справочник по автономному и резервному газоснабжению / Колл. авт.

– Санкт-Петербург : ООО «Газтехника», 2015. – 362 с.

92. Коган, В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии : учеб. пособие для студентов хим.-технол. спец. высших учеб. заведений / В. Б. Коган. – Ленинград : Химия, Ленинградское отделение, 1977. – 592 с.

93. ГОСТ Р 22.0.08-96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 1997-07-01 / Госстандарт России. – Изд. официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1996. – 8 с.

94. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика : дата введения 1984-01-01 / Госстрой СССР. – Изд. официальное. – Москва : ГП ЦПП, 1997. – 105 с.

95. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* (с Изменениями № 1, 2) : дата введения 2013-01-01 / Минрегион России. – Изд. официальное. – Москва : Минстрой России, 2015 – 96 с.

96. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 (с изменениями и дополнениями) : [Зарегистрировано в Минюсте России 17.08.2009 № 14541]. – Доступ из справочно-правовой системы Консультант Плюс.

97. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов / Д.М. Гордиенко, Ю.Н. Шебко и др. – Москва : ВНИИПО, 2012. – 242 с.

98. CEA Tech : [сайт]. – Гренобль. – URL: <http://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/accueil.aspx> (дата обращения 04.06.2012).

99. СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». – Изд. официальное. – Москва : ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009 – 96 с.

100. СТО Газпром 2-2.3-400-2009. Методика анализа риска для опасных

производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром». – Изд. официальное. – Москва : ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2010 – 275 с.

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

102. Krekhov, A.A The upgrade heat flux sensor application for early fire detection / A.A. Krekhov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin, S.N. Masaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042111. // Journal of Physics: Conference Series, 2020. – Vol. 1515, Is. 4. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/4/042111> (дата обращения 20.09.2020).

103. Патент № RU 2607770 С1 Российская Федерация, МПК А62С 3/00(2006.01), В82В 1/00(2006.01). Способ тушения пожара нанопорошком и устройство для его реализации (варианты) : № 2015130120 : заявл. 21.07.2015 : опубл. 10.01.2017 / Забегаев В.И. ; заявитель и патентообладатель ФГБУ ВНИИПО МЧС России – 22 с. : ил.

104. 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. // Actual issues of polychotomic analysis, 2019. – P. 29-46.

105. 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.

106. Krekhov, A.A Gas-air mixture explosion behaviour research at different temperatures / A.A. Krekhov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin, D A Edimichev, E V Chistova. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/5/052052. // Journal of Physics: Conference Series, 2021. – Vol. 1515, Is. 4. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/5/052052> (дата обращения 30.11.2021).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ПЕРЕЧЕНЬ АВАРИЙ ГАЗОПРОВОДОВ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ МИНУСОВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ПЕРИОД С 1989 г. ПО 2019 г.

Таблица А.1 - Перечень аварий газопроводов из открытых источников при минусовых температурах окружающей среды (составлено автором на основе [46])

Время года, дата и место ЧС	Тип аварии	Температура окружающей среды и ветер, по данным [https://rp5.ru/]	Причина аварии
1	2	3	4
14.11.1989 г. МГ «Мессояхские месторождения – Норильск»	Разрыв магистральной части газопровода с возгоранием газа.	T = -40°C, 4 м/с	Перепад температур окружающей среды
02.11.2000 г. «Лонг-Юган - Салехард» в 20 километрах от Салехарда	Разрыв магистральной части газопровода с возгоранием газа.	T = -16°C, 1 м/с	Перепад температур окружающей среды
05.01.2001 г. Вологодская область. Вологда	Взрыв на ГРС	T = -14°C, 1 м/с	Перепад температур окружающей среды
10.11.2002 г. Газопровод «Пермь-Горький» в 15 километрах от Нижнего Новгорода около поселка Митино	Взрыв газа.	T = -11°C, 3 м/с	Перепад температур окружающей среды и штиль
10.01.2004 г. Польша Александров – Лудзкий	Трещина в газопроводе высокого давления с последующим пожаром.	T = -6°C, 2 м/с	Коррозионное растрескивание
12.01.2004 г. Пермский край, Березники 1,576 км. магистрального газопровода	Прорыв газопровода с последующим возгоранием	T = -11°C, 6 м/с	Коррозионное растрескивание металла под напряжением
12.02.2004 г. МГ «Ямбург – Елецминус 1» Горно-Заводской район Пермской области	Пожар на газопроводе.	T = -6 °C, 2 м/с	Коррозионное растрескивание металла под напряжением

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
16.11.2004 г. Газопровод «Ямбург-Елецминус 1»	Прорыв трубопроводов, сопровождавшийся выбросом газа и возгоранием.	$T = -2^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Коррозионное растрескивание металла под напряжением
03.02.2005 г. Украина, Киевская область, Киев	Потеря целостности газопровода при проведении работ: - разгерметизация газопровода; - взрыв газозвушной смеси с последующим возгоранием	$T = -11^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Человеческий фактор
24.02.2005 г. газопровод «Игрим-Серов»	Порыв без возгорания одной из четырех линий газопровода Игрим-Серов.	$T = -14^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Коррозионное растрескивание металла под напряжением
09.11.2005 г. Республика Коми, г. Ухта	Взрыв на участке магистрального газопровода с выбросом газа.	$T = -5^{\circ}\text{C}$ , 5 м/с	Коррозионное растрескивание
18.12.2005 г. Томская область. Газопровод Парабель - Кузбасс.	Взрыв газа с повреждением участка магистрального газопровода	$T = -22^{\circ}\text{C}$ , 1 м/с	Перепад температур в течение суток
21.02.2006г., Украина, Черкасская область, Умань	Трещина в магистральном газопроводе с утечкой газа.	$T = -1^{\circ}\text{C}$ , 0 м/с	Проседания грунта
20.03.2006 г. «Пермь -Горький» газокомпрессорная станция магистрального газопровода	Взрыв и пожар с разрывом трубы газопровода.	$T = -3^{\circ}\text{C}$ , 3 м/с	Коррозионное растрескивание металла
08.12.2006 г. Газопровод "Прогресс" (Ямбург-западная граница) в 230 километрах северней Ханты-Мансийска	Порыв газопровода диаметром 1,4 м.	$T = -2^{\circ}\text{C}$ , 3 м/с	Коррозионное растрескивание металла

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
05.01.2007 г. 40-ой км газопровода-отвода к газораспределительной станции «Гагарин»	Разрушение магистрального газопровода без дальнейшего возгорания.	$T = -1^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Износ трубы
18.02.2007 г. 8-й км газопровода-отвода «Чусовой-Березники-Соликамскминус 2»	Разрушение трубопровода с выходом газа без возгорания.	$T = -25^{\circ}\text{C}$ , 0 м/с	Перепад температур окружающей среды и штиль
19.03.2007 г. 3,3-м км МГ «Уренгой-Новоковский» ООО «Тюментрансгаз» ОАО «Газпром»	Раскрытие трубы газопровода с возгоранием газа.	$T = -10^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Трещина в газопроводе
25.03.2007 г. МГ «Средняя Азия - Центр» ОАО «Югтрансгаз»	Раскрытие трубы газопровода с возгоранием газа.	$T = -6^{\circ}\text{C}$ , 3 м/с	Коррозионное растрескивание металла
03.04.2007 г. 749-754 км МГ «Уренгой – Центр 2»	При эксплуатации разрушение газопровода с последующим возгоранием газа.	$T = -4^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Износ трубы
01.12.2007 г. 485-ый км МГ «Средняя Азия - Центр» ООО «Волгоградтрансгаз» ОАО «Газпром»	Разрыв газопровода с возгоранием газа	$T = 0^{\circ}\text{C}$ , 6 м/с	Повреждение трубы
13 января 2008 г. Ленинградская область, Тоснинский район	Взрыв на магистральном газопроводе	$T = -1^{\circ}\text{C}$ , 7 м/с	Трещина в газопроводе
06.02.2008 г. Октябрьский район (северо-западнее города Ханты-Мансийска) МГ «Ямбург - Елецминус 1»	Прорыв магистрального газопровода с возгоранием.	$T = -25^{\circ}\text{C}$ , 0 м/с	Перепад температур окружающей среды и штиль
17.02.2008 г. Магистральный газопровод между Валдаем и Санкт-	Разрыв трубы газопровода с последующим загоранием и	$T = -3^{\circ}\text{C}$ , 7 м/с	Повреждение трубы

Петербургом в пригороде Валдая (Новгородская область).	сильным выходом пламени.		
--	--------------------------	--	--

## Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
24.12.2008 г. Ответвления магистрального трубопровода Грязовец - Петербург	Прорыв ответвления магистрального трубопровода с последующим пожаром.	$T = -6^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Коррозионное растрескивание металла
01.01.2009 г. Ростовская область, станция Егорлыкской	Порыв магистрального газопровода низкого давления.	$T = -13^{\circ}\text{C}$ , 3 м/с	Перепад температур окружающей среды
01.01.2009 г. 158-ой км магистрального газопровода «Северный Кавказ - Центр» ООО «Кавказтрансгаз»	Разрушение корпуса шарового крана с возгоранием газа.	$T = -6^{\circ}\text{C}$ , 1 м/с	Отказ запорной арматуры
05.01.2009г. 2735-м км МГ «Уренгой - Новопсков»	Разрушение газопровода с возгоранием газа.	$T = -11^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Перепад температур окружающей среды
13.01.2009 г. 1362 км МГ «Ямбург - Тула 1»	Разрушение трубопровода с последующим возгоранием газа.	$T = -16^{\circ}\text{C}$ , 3 м/с	Перепад температур окружающей среды
16.01.2009 г. 2598 км МГ «Уренгой - Новопсков»	Разрушение трубопровода с возгоранием газа.	$T = -2^{\circ}\text{C}$ , 5 м/с	Отказ запорной арматуры
15.12.2009 г. 5-м км межпромыслового газопровода «Северный Джебол– Комсомольск-на Печоре»	Разрыв газопровода по сварному шву.	$T = -45^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Воздействия низкой температуры
17.01.2010 г. Магистральный газопровод «Ставрополь-Тбилиси»	Взрыв и частичное разрушение газопровода, на месте возник пожар.	$T = -5^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Отказ запорной арматуры
21.01.2010 г. 512-ой км магистрального газопровода «Тула - Торжок»	Разрыв технологической обвязки камеры приема очистных устройств трубопровода с возгоранием газа.	$T = -17^{\circ}\text{C}$ , 0 м/с	Перепад температур окружающей среды
21.01.2010 г. магистральный газопровод «Ухта — Торжок»	Прорыв газа с последующим возгоранием.	$T = -16^{\circ}\text{C}$ , 1 м/с	Ремонтные работы на технологической обвязке газопровода

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
03.02.2010 г. ЗАО «Фирма Уралгазсервис»	Разрушение водопровода с последующим повреждение газопровода и выходом газа.	$T = -19^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Коррозионное растрескивание металла
20.02.2010 г. Вологодская область, г. Череповец	Разгерметизация стыка между НФС и фланцем подводящего газопровода к ГРПШ с выходом газа и его воспламенением.	$T = -22^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Отказ запорной арматуры
11.03.2010 г. Газопровод, 197 километр трассы «Мирный-Тас- Юрях» Якутия	Взрыв с последующим возгоранием	$T = -23^{\circ}\text{C}$ , 0 м/с	Перепад температур окружающей среды и штиль
08.12.2010 г. газопровод «Каменный Лог-Пермь» ООО «Пермнефтегаз переработка»	Разгерметизация на участке трубопровода	$T = -7^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Перепад температур окружающей среды и штиль
05.02.2011 г. Республика Коми. г. Сосногорск	Порыв газопровода.	$T = -24^{\circ}\text{C}$ , 3 м/с	Перепад температур окружающей среды и штиль
08.03.2011 г. Калмыкия, Элиста. Магистральный газопровод высокого давления	Истечение газа на участке газопровода	$T = -5^{\circ}\text{C}$ , 5 м/с	Коррозионное растрескивание под напряжением трубы
29.09.2011 г. Малоярославецком р-не Калужской области на 57,5 км магистрального газопровода «Якшуновская СПХГ-КС Белоусово»	Разгерметизация газопровода с остановкой газоснабжения	$T = -3^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Коррозионное растрескивание под напряжением трубы
30.10.2011 г. ОАО «Самотлорнефтегаз» от кустовой площадки № 829 до гребёнки комплексного сборного пункта № 23	Разгерметизации нефтесборного трубопровода	$T = -6^{\circ}\text{C}$ , 1 м/с	Отказ запорной арматуры



Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
01.11.2011 г. Магистральный газопровод «Средняя Азия-Центр 3» (Старожилковский р-н Рязанской обл. на 1 928,05 км)	Разгерметизация газопровода с остановкой газоснабжения	$T = -19^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Дефект на участке кольцевого сварного шва
03.03.2013 г. 1704 км 1-й нитки магистрального газопровода «Бухара–Урал»	Разрушение шести трубных секций с возгоранием газа	$T = -11^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Брак при производстве
04.01.2014 г. с. Вознесенское Ивнянского района Белгородской области на предприятии ОАО «КапиталАгро»	Разрушение трубы неразъемного соединения сталь-полиэтилен из-за	$T = -26^{\circ}\text{C}$ , 0 м/с	Дефект в виде расслоения на внутренней поверхности полиэтиленовой трубы
05.02.2014 г. Подземный газопровод среднего давления III категории Ду 600 «Группа компаний Интер-Логистик»	Коррозионное разрушение подземного газопровода	$T = -24^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Повреждение изоляции газопровода и воздействие блуждающих токов
24.10.2015 г. газопровод «Уренгой-Новопсков»	Утечка и возгорание газа.	$T = -1^{\circ}\text{C}$ , 6 м/с	Дефект продольного шва, допущенный при заводском изготовлении трубы
08.01.2016 г. газопровод «Починки-Изобильное-Северо-Ставропольское ПХГ» на узле подключения КС-06» Ольховская»	Разрушение участка газопровода между входным шлейфом перед краном и камерой запуска очистного устройства	$T = -24^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Механическое повреждение металла стенки трубы (задир) полученного во время строительства газопровода
21.01.2016 г. 88 км магистрального конденсатопровода «Заполярье НГКМ – г. Новый Уренгой», 2011 г. ввода в эксплуатацию.	Разгерметизация обвязки кранового узла с выходом конденсата	$T = -22^{\circ}\text{C}$ , 4 м/с	Одиочная трещина в результате совместного воздействия следующих факторов: изготовление перехода с нарушением требований проектной документации; несоответствие основного металла

			трубы по значениям ударной вязкости перехода хладостойкому климатическому
--	--	--	---

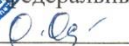
Окончание таблицы А.1

1	2	3	4
			исполнению; воздействие деформаций от действия изгибающих нагрузок
29.04.2016 г. 5,6 км магистрального газопровода «Белоусово-КГМО» Белоусовского ЛПУМГ, 1965 г. ввода в эксплуатацию.	Разрушение трубной секции диаметром 820 мм с утечкой и возгоранием газа	$T = -5^{\circ}\text{C}$ , 4м/с	Механические повреждения трубы при проведении строительных работ вблизи газопровода
04.09.2018 г. 27 км магистрального газопровода-отвода к ГРС г. «Железногорск» 2 нитка, 1976 г. ввода в эксплуатацию.	Разгерметизация газопровода с остановкой газоснабжения	$T = -2^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Дефект в основном металле трубы, образовавшийся по механизму коррозионного растрескивания под напряжением
28.02.2019 г. Южно-Русском нефтегазовое месторождение (Красноселькупский р-н; УТЭН по Ямало-Ненецкому автономному округу, Новоуренгойский отдел).	Повреждение трубопровода с воспламенением газа	$T = -24^{\circ}\text{C}$ , 2 м/с	Усталость металла

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА  
ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**



УТВЕРЖДАЮ  
Ректор  
ФГАОУ ВО «Сибирский  
Федеральный университет»  
 М.В. Румянцев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**в учебный процесс Институт нефти и газа ФГАОУ ВО «Сибирский  
Федеральный университет» результатов диссертационной работы  
Крехова А.А. на тему «Разработка метода и прибора контроля взрыва  
газовоздушной смеси по измерению теплового потока»**

Результаты диссертационной работы Крехова А.А. внедрены в учебный процесс Институт нефти и газа Сибирского федерального университета на кафедре «Пожарная безопасность» и используются при проведении практических занятий по дисциплинам: «Производственная и пожарная автоматика», «Автоматические системы управления и связь», «Пожарная безопасность технологических процессов», «Опасные факторы пожара».

Методическая и экспериментальная работы позволили повысить уровень подготовки специалистов по пожарной безопасности, усовершенствовать исследовательскую часть при проведении практических занятий и лабораторных работ.

Заведующий кафедрой  
«Пожарная безопасность»,  
канд. техн. наук, доцент.

А.Н. Минкин

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

# АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Главного  
управления – начальник управления  
надзорной деятельности и  
профилактической работы Главного  
управления МЧС России  
по Красноярскому краю  
полковник внутренней службы

Хрулькевич А.Л.

2021 г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВЗРЫВА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ  
ПО ИЗМЕРЕНИЮ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА  
выполненной КРЕХОВЫМ АЛЕКСЕЕМ АЛЕКСЕЕВИЧЕМ  
(ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВОБЕСПЕЧЕНИЯ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
внедрены в ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО  
ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ  
ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ ПО КРАСНОЯРСКОМУ КРАЮ (ГУ МЧС  
РОССИИ ПО КРАСНОЯРСКОМУ КРАЮ)

1 Вид внедренных результатов: ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НИЗКИХ  
ТЕМПЕРАТУР НА ДИНАМИКУ ВЗРЫВА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ  
эксплуатация (изделия, работы, технологии), производства (изделия, работы, технологии) и др.

2 Характеристика масштаба внедрения: ОЦЕНКА АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ  
ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ

3 Форма внедрения: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
методика (метод)

4 Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ  
(инновационные, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)

5 Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
ВНЕДРЯЕМОГО МЕТОДА И ПАТЕНТОМ НА ДАТЧИК КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО  
ПОТОКА

6 Внедрены: В ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ НАДЗОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И  
ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ГУ МЧС РОССИИ ПО КРАСНОЯРСКОМУ КРАЮ

7 Годовой эффект

Ожидаемый —

Фактический —

8 Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —

9 Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу  
гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

10 Социальный и научно-технический эффект ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРНОЙ  
ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(охрана окружающей среды, велр: улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор разработанного метода контроля

А.А. Крехов

Директор «Института  
нефти и газа», к.т.н.

П.Ш. Аюпов

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

# АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
АО «Красноярсккрайгаз»  
Коваль А.В.  
« 2021 г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВЗРЫВА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ  
ПО ИЗМЕРЕНИЮ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

выполненной КРЕХОВЫМ АЛЕКСЕЕМ АЛЕКСЕЕВИЧЕМ  
(ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЯ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

внедрены в АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КРАСНОЯРСККРАЙГАЗ» (АО  
«КРАСНОЯРСККРАЙГАЗ»)

1 Вид внедренных результатов: МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА  
ДИНАМИКУ ВЗРЫВА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ  
эксплуатация (изделия, работы, технологии), производства (изделия, работы, технологии) и др.

2 Характеристика масштаба внедрения: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИКИ ВЗРЫВА  
ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ

3 Форма внедрения: МЕТОД КОНТРОЛЯ  
методика (метод)

4 Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ  
(пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)

5 Опытнo-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
ВНЕДРЯЕМОГО МЕТОДА И ПАТЕНТОМ НА ДАТЧИК КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

6 Внедрены: В ЭКСПЛУАТАЦИЮ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

7 Годовой эффект

Ожидаемый —

Фактический —

8 Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —


9 Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

10 Социальный и научно-технический эффект РАЗРАБОТАН МЕТОД КОНТРОЛЯ И  
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЛИЯНИЮ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА  
ДИНАМИКУ ВЗРЫВА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ  
(охрана окружающей среды, непр. улучшение и оздоровление условий труда, специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор разработанного метода и прибора

 А.А. Крехов

Директора «Института  
нефти и газа», к.т.н.

 Р.Ш. Анопов





## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ №195452**  
**«ДАТЧИК КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 195452

**ДАТЧИК КОНТРОЛЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Крехов Алексей Алексеевич (RU), Клочков Святослав Владимирович (RU), Минкин Андрей Николаевич (RU), Едимичев Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2019123250

Приоритет полезной модели 18 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 28 января 2020 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 18 июля 2029 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев