

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

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Гумиров Андрей Сергеевич

**ПОДАЧА КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ
СИСТЕМАМ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискателя ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Алешков Михаил Владимирович

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 РАЗМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ЭТИХ ОБЪЕКТАХ.....	11
1.1 Анализ тушения пожаров на объектах энергетики	11
1.2 Размещение объектов энергетики на территории Российской Федерации	19
1.3 Средства тушения пожаров на объектах энергетики	24
1.4 Цель и задачи исследования	29
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР	31
2.1 Анализ применения огнетушащих пен для тушения пожаров на объектах энергетики.....	31
2.2 Конструктивные и технические особенности установок получения и подачи компрессионной пены	37
2.3 Экспериментальное определение массового расхода компрессионной пены в зависимости от режима работы установки	43
2.4 Экспериментальное определение параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур.....	50
2.4.1 Разработка и создание измерительного комплекса для проведения натуральных экспериментов	50
2.4.2 Проведение натуральных экспериментов	53
2.5 Математический анализ результатов экспериментальных исследований по оценке охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур.....	64

2.6 Выводы по второй главе.....	79
ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА	81
3.1 Разработка программного комплекса по предварительной оценке возможностей подразделений пожарной охраны по обеспечению работоспособности пожарной техники при подаче компрессионной пены в условиях низких температур.....	82
3.2 Концепция разработки отечественной пожарной автоцистерны с элементами «северного» исполнения, оснащенной системой подачи компрессионной пены для защиты объектов энергетики	86
3.2.1 Системы получения и подачи компрессионной пены, адаптированные для работы в условиях отрицательных температур воздуха	90
3.3 Оценка эффективности предложенных технических решений	94
3.4 Разработка рекомендаций по применению технологии подачи компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур.....	98
3.4.1 Особенности возникновения пожаров на объектах атомной энергетики	98
3.4.2 Общие требования по применению компрессионной пены	101
3.4.3 Общие требования применения компрессионной пены в условиях низких температур.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
Приложение А РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....	127
Приложение Б РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ	

ТЕМПЕРАТУР С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ВЕТРА.....	133
Приложение В ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ МОДЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ.....	140
Приложение Г ЗАВИСИМОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПО ДЛИНЕ НАСОСНО-РУКАВНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР	159
Приложение Д ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	169
Приложение Е АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	172
Приложение Ж СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ЭВМ.....	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Территория Российской Федерации размещается в различных климатических поясах, при этом более 85 % территории страны находится в холодных климатических районах. В этих районах сосредоточено порядка 80 % критически важных объектов топливно-энергетического комплекса страны и с каждым годом количество этих объектов растет [1, 2].

Для обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики, функционирующих в районах с холодным климатом, требуется разработка дополнительных мероприятий в данной области. Ликвидация пожара должна осуществляться на начальной стадии, чтобы не допустить его развития до крупных размеров. Эффективность тушения пожаров на объектах энергетики при воздействии низких температур во многом будет зависеть от слаженности действий пожарно-спасательных подразделений и работоспособности пожарной техники [3].

Топливо-энергетический комплекс нашей страны включает в себя 846 крупных электростанций суммарной мощностью 250 ГВт. Энергетический сектор – это основа экономики страны, поскольку отрасль обеспечивает жизнедеятельность людей, общества и государства. Благополучие страны, а также эффективность других отраслей экономики, таких как машиностроение, судостроение, оборонная промышленность и других, зависят от нормального функционирования энергетики. Каждый год растет потребность в электроэнергии. Так, в 2023 году было произведено 1,15 трлн кВт·ч. Данная потребность имеет критическое значение для экономики [4].

В результате такого роста потребности существующие объекты по производству электроэнергии столкнулись с перегрузкой. Промышленное оборудование на объектах энергетики изнашивается, что способствует возникновению крупных пожаров и аварий, сопровождающихся не только крупным прямым, но и косвенным ущербом. Косвенный ущерб включает в себя:

прекращение подачи тепло- и электроэнергии, что влечет за собой остановку крупных промышленных предприятий, гарантирующих удовлетворение внутренних потребностей экономики и безопасности хозяйственной отрасли страны.

Проблема обеспечения пожарной безопасности и ликвидации пожаров на объектах энергетической инфраструктуры приобретает особую значимость в условиях низких температур. Эксплуатация пожарного оборудования в данных условиях сопряжена с рядом специфических трудностей, что актуализирует разработку и внедрение специализированных технических средств. В связи с этим наблюдается прогресс в области создания новых установок тушения, функционально приспособленных для применения в условиях низких температур.

Степень разработанности темы исследования. В Академии ГПС МЧС России сформировалась научная школа «Разработка, создание и эксплуатация пожарной и аварийно-спасательной техники», основанная М.Д. Безбородько, в рамках которой изучается проблема тушения пожаров в условиях низких температур. За 50-летнюю деятельность научной школы проведено много исследований в области обеспечения работоспособности насосно-рукавных систем пожарной техники в условиях низких температур.

Значительный вклад в развитие пожаротушения в условиях низких температур внесли такие ученые, как: М.А. Савин, Е.М. Желваков, Г.И. Егоров, М.В. Алешков, О.В. Двоенко. Все они проводили исследования в области обеспечения работоспособности насосно-рукавных систем и пожарных автомобилей в условиях низких температур с применением воды в качестве огнетушащего вещества [5–13].

Эффективность же пенных составов при тушении пожаров на объектах энергетики обусловлена несколькими факторами. Во-первых, на этих объектах преобладает пожарная нагрузка, состоящая из полимерных материалов и горючих жидкостей. Во-вторых, пенные составы обладают улучшенными физическими свойствами, позволяющими им проникать в труднодоступные места и удерживаться на вертикальных поверхностях, что особенно важно при тушении

технологического оборудования, а также использование пенных составов позволяет минимизировать вторичный ущерб от пролива воды, что критично для электрооборудования на объектах энергетики.

Все проведенные ранее исследования были направлены на изучение воды в качестве огнетушащего вещества. Одним из современных способов тушения пожаров является компрессионная пена. Пена, полученная данным способом, отличается от воздушно-механической пены своими физическими свойствами.

Многие ученые в своих работах исследовали возможности применения компрессионной пены и ее подачи при тушении пожаров (Качалов А.А., Е.В. Синельникова, Грачулин А.В., Федяев В.Д. и др.) [14–24].

Однако анализ этих работ показал, что до настоящего времени не изучался вопрос подачи компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур окружающей среды.

Таким образом, **целью исследования** является определение зависимости охлаждения компрессионной пены от параметров подачи с помощью насосно-рукавных систем в условиях низких температур.

Основные задачи исследования:

- проанализировать условия и способы тушения пожаров на объектах энергетики с учетом их размещения в различных климатических районах на территории Российской Федерации;

- разработать специальный измерительный комплекс, программы и методики проведения экспериментальных исследований процесса охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур окружающей среды;

- определить и обосновать математическую модель охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур;

- разработать рекомендации и программный комплекс для предварительного планирования тушения пожаров с учетом особенностей охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях

низких температур;

- обосновать технические решения для поддержания работоспособности пожарного автомобиля при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур.

Объектом исследования являлась подача компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики.

Предметом исследования рассматривалось охлаждение компрессионной пены, подаваемой по насосно-рукавным системам в условиях низких температур при тушении пожаров на объектах энергетики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) получена регрессионная зависимость на основании новых экспериментальных данных охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур;

2) предложена и обоснована математическая модель процесса охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур;

Теоретическая значимость обоснована тем, что на основе экспериментальных данных, полученных с помощью специального измерительного комплекса определены математические зависимости, позволяющие оценить работоспособность насосно-рукавных систем при подаче компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур окружающей среды.

Практическая значимость заключается в том, что разработан программный комплекс, позволяющий на этапе предварительного планирования сил и средств подразделений пожарной охраны, оценить параметры подачи компрессионной пены в условиях низких температур окружающей среды, а также обоснованы технические решения для поддержания работоспособности пожарного автомобиля при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур. Даны рекомендации по применению технологии подачи компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях

низких температур.

Методология и методы исследования: основу исследования составляли методы математического моделирования и физического подобия, физические экспериментальные исследования, методы математического анализа данных, описание. Результаты численных расчетов подтверждены результатами экспериментальных исследований, в том числе выполненных другими авторами.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований режимов работы насосно-рукавных систем при подаче компрессионной пены при низких температурах окружающей среды до минус 30 °С;

- математическая модель, позволяющая описать процесс охлаждения компрессионной пены, подаваемой по насосно-рукавным системам в условиях низких температур окружающей среды;

- программный комплекс предварительного планирования тушения пожаров с применением насосно-рукавных систем подачи компрессионной пены с учетом особенностей ее охлаждения в условиях низких температур;

- технические требования для пожарного автомобиля для тушения пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур.

Степень достоверности основных результатов работы обусловлены удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных исследований, которые проводились с использованием современных средств измерения, аккредитованного лабораторного и измерительного оборудования и методов проведения исследований, с результатами математического моделирования исследуемых процессов для идентичных условий.

Апробация результатов. Основные результаты работы доложены на: Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в

нефтегазовой отрасли» (Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020); XIV Международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» Минск, Университет гражданской защиты, 2020); XXXII Международной научной конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (Москва, ВНИИПО МЧС России, 2020); 29-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2021» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021).

Публикации. По теме работы опубликовано 15 научных работ, в том числе 8 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России, получено 2 свидетельства о Государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура, объем работы и ее основные разделы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержание работы изложено на 181 странице машинописного текста, включает в себя 13 таблиц, 50 рисунков, список литературы из 143 наименований, 7 приложений.

ГЛАВА 1 РАЗМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ЭТИХ ОБЪЕКТАХ

1.1 Анализ тушения пожаров на объектах энергетики

Условия функционирования объектов энергетики на территории Российской Федерации в наше время вызывают озабоченность: данные объекты работают в режиме постоянной эксплуатации и при непрерывных критических параметрах нагрузки. Исходя из этого повышается пожароопасность объектов энергетического комплекса, что влечет за собой необходимость постоянного контроля за пожарной безопасностью. Ежегодно потребность в электроэнергии растет в геометрической прогрессии, поэтому на сегодняшний день энергетика Российской Федерации перенапряжена [25]. По данным Министерства энергетики Российской Федерации, в течение прошлого года для нужд обеспечения страны было произведено 1151,6 млрд кВт ч электроэнергии. Согласно статистике, на начало 2023 года энергосистема страны включала в себя электростанции, мощность которых превышала 250 тысяч МВт [26].

Энергия в РФ генерируется, в основном, на 3 типах объектов:

- тепловые электростанции (ТЭС);
- гидравлические электростанции (ГЭС);
- атомные электростанции (АЭС) (рисунок 1.1).

Следует отметить динамику роста темпов использования электростанций в энергетической отрасли, что требует более внимательного подхода к обеспечению пожарной безопасности установок и вспомогательного оборудования. Учитывая специфику энергетической отрасли в Российской Федерации, актуальными стали вопросы об обеспечении безопасности и при аварийных режимах работы. Аварийный выход из строя оборудования при неблагоприятном стечении обстоятельств может стать причиной масштабных пожаров на электростанциях.

Катастрофический характер протекания таких пожаров становится причиной огромных финансовых потерь, подвергает опасности жизнь и здоровье людей, работающих на предприятии и проживающих в непосредственной близости от объектов энергетики. Наиболее сложными, опасными и непредсказуемыми являются пожары на атомных электростанциях (АЭС) [27].



Рисунок 1.1 – Кольская атомная электростанция

В связи с плотной зависимостью практически всех областей функционирования человека от электроэнергии, производимой на электростанциях, выход из строя оборудования на таких станциях влечет за собой огромное множество скрытых проблем. Основной ущерб, который связан с выходом из строя дорогостоящего оборудования и отказа в работе систем объекта энергетики, приводит к косвенному ущербу, который, в свою очередь, несет в себе угрозу жизни и здоровью населения.

Если рассматривать количество произошедших пожаров на объектах энергетики за период с 2014 по 2023 гг. по регионам, то можно определить

следующую зависимость. В регионах с холодным климатом происходит более 50 % пожаров, большая часть которых становятся сложными и затяжными. И если количество пожаров на объектах энергетики не так велико по сравнению с другими пожарами (таблица 1.1), то величина материального и экологического ущерба от них значительна [28–30].

Таблица 1.1 – Распределение пожаров на объектах энергетики по климатическим районам за период с 2014 по 2023 гг.

Климатический район	Количество пожаров	Доля от общего числа пожаров, %
Очень холодный	87	6,7
Холодный	192	14,7
Умеренно-холодный	415	31,8
Умеренный	486	37,3
Умеренно-теплый	124	9,5
Итого:	1304	100,00

Для более наглядного представления о ситуации с пожарами на объектах энергетики был проведен анализ данных за период с 2014 по 2023 гг. и построена диаграмма с распределением пожаров на этих объектах в зависимости от климатических районов (рисунок 1.2).

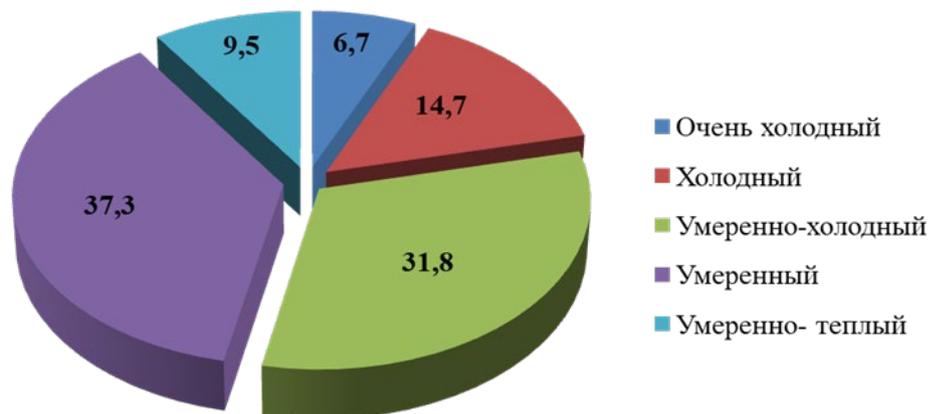


Рисунок 1.2 – Распределение пожаров на объектах энергетики по климатическим районам за период с 2014 по 2023 гг.

Так, например, в 2005 году пожар на тепловой подстанции № 510 «Чагино» в г. Москве (рисунок 1.3) привел к тому, что осложнилась работа московского

метрополитена, нарушилось железнодорожное сообщение, работа многих коммерческих и государственных организаций была парализована. Московское метро столкнулось с самой масштабной чрезвычайной ситуацией за всё время своего существования: вышли из строя 52 из 170 станций. Общий размер ущерба от данной аварии составил 1,7 млрд руб. для Москвы и 504 млн руб. для Московской области [31].



Рисунок 1.3 – Пожар на тепловой подстанции №510 «Чагино»

Наиболее энергоэффективными объектами энергетики нашей страны являются тепловые, гидравлические и атомные электростанции. Наивысшие показатели энерговыработки показывают тепловые электростанции: их совокупная доля выработки составляет 56,8 % от совокупного объема выработанной электроэнергии.

В структуре мощностей электростанций северных регионов России преобладают тепловые станции (ТЭС, ТЭЦ) на органическом топливе — 77 %. На гидроэлектростанции приходится 17 %, на атомные — 6 %.

В пяти регионах страны: Республике Коми, Архангельской области, Ханты-Мансийском автономном округе, Ямало-Ненецком автономном округе, Сахалинской области – тепловая электроэнергетика является безальтернативной основой.

Таким образом, доля размещения ТЭС в северных районах может составлять около 87 % от общего количества тепловых электростанций в России.

Главным источником пожарной опасности ТЭЦ является органическое топливо, хранящееся на складских объектах при станции: торф, уголь, мазут. Не меньшую опасность представляет разветвленная система газопроводов и объектов, подготавливающих топливо к сжиганию. Ставшее нормальной практикой полиблочное расположение энергоблоков на ТЭС, к сожалению, помимо логистических преимуществ, является также очень благоприятной средой для распространения пожара по всему комплексу и соседствующим энергетическим установкам.

Основное здание станции энергетического оборудования включает в себя котельную, машинный зал, где находятся различные механизмы и оборудование, и служебные помещения для персонала обслуживания. Как правило, вблизи этих помещений располагаются центральный щит управления, который отвечает за координацию работы оборудования, а также устройство контроля генераторного напряжения, следящее за процессами, связанными с производством электроэнергии на станции. [32].

Особенности технологического процесса обусловили размещение резервуаров системы смазки генераторов на уровне нижней отметки в помещениях с насосным оборудованием и маслопроводами, рабочее давление в которых достигает 1,4 МПа. В условиях пожара вероятно интенсивное распространение пламени по разгерметизированным масляным трассам, локализованным на нулевой отметке. [33-34].

Длительное же тепловое воздействие инициирует потерю несущей способности металлических ферм и иных элементов каркаса машинного зала, что может привести к их деформации и прогрессирующему обрушению. Кроме того, горение смазочных материалов создает предпосылки для взрывного разрушения находящихся под давлением сосудов и трубопроводов [35-38].

Разрушительный характер пожаров на объектах энергетики становится причиной множества непоправимых последствий. Эти факторы дополнительно

усугубляются условиями низких температур, в которых проводится тушение пожара, и возникающими в связи с этим проблемами. Рассмотрим наиболее значимые аварии и пожары на объектах энергетики. [37]

2 декабря 2006 г. в Свердловской области на объекте Рефтинской ГРЭС ОАО «ОГК-5» произошло трехфазное короткое замыкание цепи с последующим выбросом масла и дальнейшим его возгоранием. По заключениям экспертов, причиной аварии стало разрушение бандажного кольца ротора генератора № 10. Образовавшийся от пламени тепловой поток очень быстро привел в негодность металл, из которого состояли фермы, от чего произошла деформация балки и последующее разрушение всех опорных узлов на площади около 2500 м² [36].

Благодаря слаженным и отработанным действиям персонала и пожарных электростанции, пожар был локализован и ликвидирован. Руководитель тушения пожара присвоил пожару третий ранг сложности. На месте тушения одновременно работали 11 единиц пожарной техники. Последствия были критичны, но не катастрофичны: были остановлены два энергоблока ГРЭС, однако электричество и отопление поступало потребителям без перебоев.

19.01.2010 года произошло возгорание в ТЭЦ-3 Барнаульского филиала ОАО «Кузбассэнерго». Пламя стремительно распространилось по транспортёру и переместилось на верхние этажи здания главного корпуса ТЭЦ (рисунок 1.4). Пожар получил третий ранг сложности. Общая площадь пожара составила более 700 м².

Самую большую опасность в сложившейся ситуации представляло резкое снижение уровня энергоподдачи и отопления. В тех климатических условиях это могло стать тяжелейшим коммунальным бедствием, ведь на момент пожара температура воздуха в городе опускалась вплоть до -13 °С. По заявлениям экспертов, причиной пожара могла стать неисправность в работе износившегося оборудования [39]. Кроме этого, ключевым фактором стало то, что на объекте не были выполнены требования по снижению пожарной опасности согласно приказу ОАО РАО «ЕЭС России» №120 от 01.07.1998.



Рисунок 1.4 – Пожар на ТЭЦ 3 –в городе Барнаул

Еще одним показательным происшествием, которое произошло при низких температурах окружающей среды, был пожар, случившийся 3 января 1979 года на ТЭЦ-21 в г. Москве – объекте, являющемся ключевым поставщиком тепло- и электроэнергии для большого ряда московских социально значимых и производственных объектов [40].

Не выдержала стальная задвижка, расположенная на линии байпаса. При разгерметизации системы разогретые мазут и дизельное топливо попали на работающий котел. Примерзшая от 40-градусного мороза задвижка не была закрыта, и подачу мазута предотвратить не представлялось возможным долгое время. Всё это послужило причиной произошедшего впоследствии взрыва в помещении цеха.

Из-за взрывной волны произошло разрушение железобетонного потолочного перекрытия над главным корпусом, из-за чего в помещении образовалась опасная смесь паров топлива и газа с воздухом. Это привело к быстрому распространению пожара, причем скорость горения мазута увеличивалась экспоненциально. В результате общая площадь возгорания достигла 1000 м². Такая ситуация создавала серьезную угрозу разрушения всего цеха и обрушения машинного зала. В конечном итоге это могло привести к потере тепла и освещения для 60 % местного населения, особенно в условиях низкой температуры воздуха, что угрожало их безопасности.

Руководство чрезвычайного ведомства, прибывшее на пожар, дало пожару максимальный ранг сложности – пятый. Совладать с неуправляемой огненной стихией одновременно пытались 550 человек личного состава. Основным фактором, снижающим эффективность действий пожарных подразделений, был мороз – температура воздуха достигала -40 °С. Пожарные автомобили один за одним выходили из строя, а огнетушащие вещества замерзали в насосно-рукавных системах, тем самым парализуя тушения пожара. Все это осложняло обеспечение требуемого количества огнетушащего вещества (далее ОТВ). Пожар пытались локализовать более шести часов. Лишь по прошествии этого времени руководитель тушения объявил о ликвидации пожара. В ходе пожара были уничтожены 3 паровых котла и вся их коммуникационная система.

Процесс развития пожара с момента возникновения до момента подачи огнетушащих веществ состоит из нескольких временных интервалов, и этот период называется временем свободного развития пожара. Данный параметр обычно выражается с использованием специальной формулы, которая отражает характеристики и динамику распространения пожара [41]:

$$\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{дс}} + \tau_{\text{сб}} + \tau_{\text{сл}} + \tau_{\text{бр}}, \quad (1.1)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ – время свободного развития пожара, мин;

$\tau_{\text{дс}}$ – время от начала возникновения пожара до сообщения о пожаре в пожарную часть, мин;

$\tau_{\text{сб}}$ – время сбора и выезда по тревоге, мин;

$\tau_{\text{сл}}$ – время следования к месту пожара, мин;

$\tau_{\text{бр}}$ – время развертывания с расстановкой сил и средств подразделения пожарной охраны, мин.

Специфика пожаров на объектах энергетической отрасли требует большего количества подготовительных мероприятий (заземление пожарного оборудования и отключение от питания электрических установок) [38].

В связи с этим формула свободного развития пожара видоизменяется и приобретает вид:

$$\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{дс}} + \tau_{\text{сб}} + \tau_{\text{сл}} + \tau_{\text{бр}} + \tau_{\text{обест}} + \tau_{\text{зазем}}, \quad (1.2)$$

Где $\tau_{\text{обест}}$ – время обесточивания электрооборудования, мин;

$\tau_{\text{зазем}}$ – время заземления средств тушения, мин.

Все это приводит к отложенному началу тушения, что неблагоприятно сказывается на вероятности быстрой локализации пожара и подвергает пожарных дополнительному риску.

Примером чрезвычайной ситуации, повлекшей тяжелые последствия, может стать пожар, произошедший в декабре 2021 года на ТЭЦ-1 в г. Улан-Уде при температуре окружающего воздуха -29 °С. Из-за пожара в кабельном отсеке произошла авария, из-за чего пришлось резко снизить температуру горячей воды в системе отопления города. В Улан-Удэ из-за пожара на ТЭЦ власти ввели режим чрезвычайной ситуации. Пришлось ограничить подачу тепла в 800 домах, закрыть несколько детских садов и эвакуировать пациентов больницы. Тушение пожара пожарными подразделениями осложнялось низкими температурами и отказами пожарной и аварийно-спасательной техники [37].

Анализ пожаров и аварийных ситуаций на территории РФ показал, что ежегодно на объектах энергетики возникают ЧС, и хотя их количество невелико, но последствия от них значимы для территорий и экономики страны в целом. К масштабам последствий стоит отнести материальный ущерб и возникающие огромные экологические проблемы для окружающей среды. Подразделения пожарной охраны показывают эффективность при тушении данных пожаров, однако осложняющий фактор в виде низкой температуры окружающей среды влечет за собой отказы пожарной техники и трудности при подаче огнетушащих веществ.

1.2 Размещение объектов энергетики на территории Российской Федерации

Климатическое разнообразие территории Российской Федерации обуславливает необходимость анализа размещения объектов энергетического

комплекса. Для холодных климатических районов характерен суровый климат. 85 % территории России относится к холодным регионам. Ненецкий автономный округ является районом Крайнего Севера. Это район арктической территории. Зима приходит туда уже в конце сентября – начале октября, что не характерно для других регионов Российской Федерации. И начиная с этого момента температура на данной территории не поднимается выше нуля: от $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юго-западе до $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ на северо-востоке. Нормальным явлением будет отметить в середине января крайне низкую температуру, вплоть до $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако температура упасть и до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такая ситуация наиболее характерна для таких городов Крайнего Севера, как Норильск и Воркута. Температура там может опускаться до $-53,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оймякон считается полюсом холода северного полушария и здесь в 1938 году был зафиксирован абсолютный минимум температуры в России $-71,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя температура зимой составляет $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя годовая температура – $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На Дальнем Востоке зимняя погода начинается в ноябре. Меньше других зиму ощущают в приморье, на Камчатке и на острове Сахалин – там она коротка и теплая. Зима в Магаданской области и на Амуре – самая суровая в регионе. Столбик термометра в этих местах может опускаться до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [42-46].

Чукотский автономный округ характеризуется довольно суровым климатом, несмотря на относительно невысокое расположение по широте, и превосходит своими характеристиками климат соседней Аляски. В целом климат здесь обладает муссоноподобным характером, особенно на Беринговом побережье, с длительной зимой (ветреной на востоке и очень холодной на западе) и коротким, но достаточно теплым летом на большей части территории. Средние годовые температуры на всей территории Чукотки отрицательные и снижаются с юга на север от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Благодаря уникальному географическому положению, протяженности с запада на восток и с юга на север, Россия занимает лидирующее положение в Евразии по числу климатических поясов.

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации №1209-р от 09 июня 2017 года, «Об утверждении Генеральной схемы размещения

объектов электроэнергетики до 2035 года» [47], энергетическая стратегия России предусматривает переход к инновационному развитию и формированию инфраструктуры новой экономики страны. Для выполнения обозначенных задач крайне важно увеличить энергоэффективность в отраслях топливного и энергетического комплекса. Для реализации планов по повышению объемов выработки электроэнергии большое количество объектов энергетики планируется разместить в холодных районах России.

В рамках реализации Постановления Правительства и Указа Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» в 2021 г. завершено строительство единственной в мире плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» (ПАТЭС) (рисунок 1.5). Эта станция предназначена для снабжения Чукотского автономного округа тепловой и электрической энергией. Исходя из всех условий, было принято решение о конечной точке размещения ПАТЭС в северном порту России в г. Певек на Чукотке.



Рисунок 1.5 – Внешний вид плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов»

Атомные реакторы типа КЛТ-40С, которые установили на ПАТЭС, уже много лет эксплуатировались в тяжелейших условиях севера на атомных ледоколах [4].

Климатические условия регионов Российской Федерации значительно различаются и определяются разнообразными факторами. В целом Россия расположена в основном в высоких и средних широтах, что объясняет суровый

климат большей части страны, с четко выраженной сменой времен года, длительной зимой и коротким летом.

Основой для разделения страны на климатические районы является среднемесячная температура с учётом влажности атмосферного воздуха. Территория России разделена на три основные климатические зоны: северную, зону умеренного климата и южную. Каждая из этих зон в свою очередь подразделена на более мелкие природно-климатические пояса или районы, которые классифицируются согласно ГОСТ 16350-80 [48] как очень холодный, холодный, умеренно холодный, умеренный и умеренно теплый. Особенно важно отметить, что согласно этому стандарту, холодные климатические районы занимают более 85% всей территории России (рисунок 1.6).

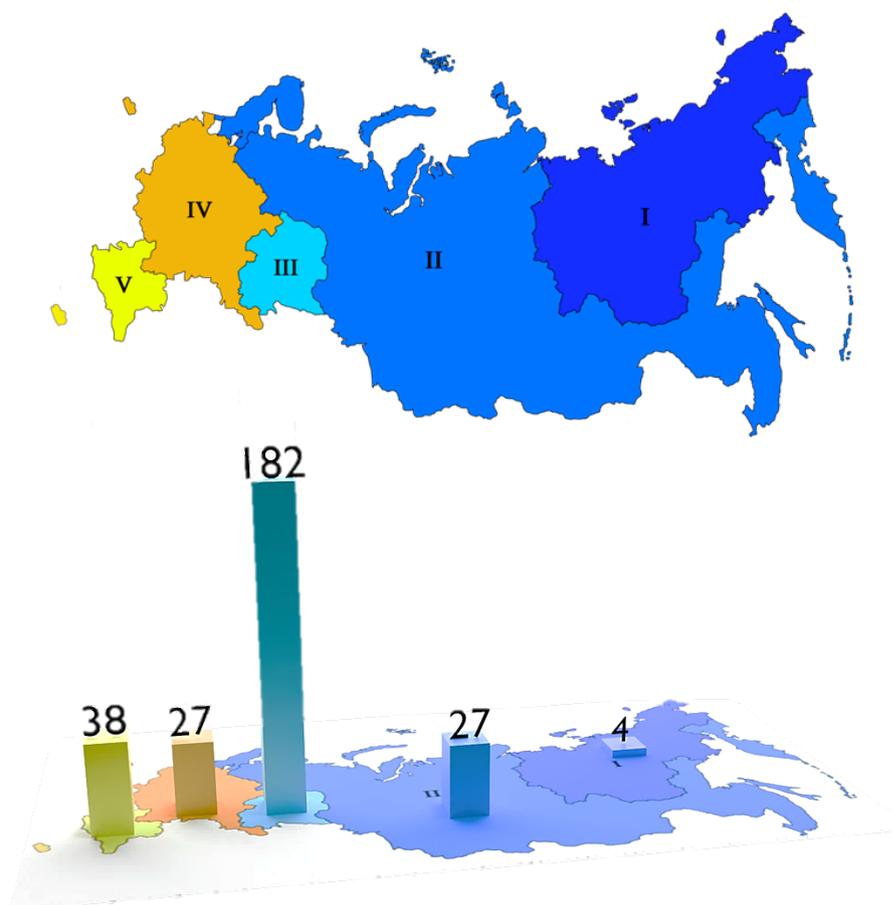


Рисунок 1.6 – Климатические районы России и расположенные в них объекты энергетики:
 I – очень холодный; II – холодный; III – умеренно холодный;
 IV – умеренный; V – умеренно-теплый, влажный

Значительное количество объектов энергетики расположено на территории

с суровым климатическим климатом. Такое территориальное размещение объектов энергетики повышает риски возникновения и развития сложной ситуации, ЧС и пожаров на этих объектах. Одним из основных факторов представляющих опасность на этих территориях является низкая температура. Одновременное сочетание опасных климатических факторов и ЧС на объектах энергетики может приводить к тяжелым последствиям и значительному материальному ущербу.

Анализ распределения объектов энергетики на территориях различных климатических районов позволяет сделать вывод, что более 75 % крупных объектов энергетики расположены в районах с холодным климатом.

Для оценки ситуации, в зависимости от периода года, были проанализированы данные о распределении пожаров на объектах энергетики в различные периоды года (рисунок 1.7).

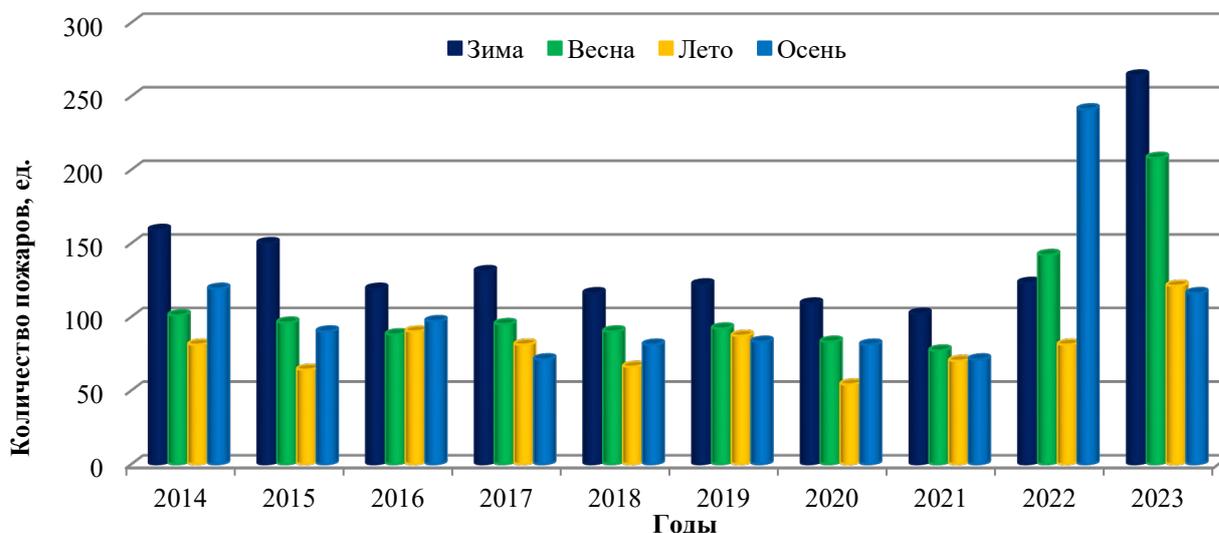


Рисунок 1.7 – Распределение пожаров на объектах энергетики в различное время года за период с 2014 по 2023 гг.

В результате проведенного анализа становится очевидно, что количество пожаров на объектах энергетики в зимний период превышает количество пожаров в любое другое время года. Одним из ключевых факторов, влияющих на развитие пожаров, являются низкие температуры окружающего воздуха, типичные для зимнего сезона. Это метеорологическое явление способствует увеличению риска

возникновения и распространения пожаров, что делает зимний период наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности на энергетических объектах.

Для обеспечения защищенности объектов энергетики в условиях низких температур важно предотвращать развитие пожара до крупных масштабов, что является серьезной задачей для пожарной охраны [49-54]. Поэтому необходимо изучить особенности работы оперативных подразделений МЧС России в различных климатических условиях, особенно при отрицательных температурах окружающей среды. В этой связи требуется провести исследование эффективности средств пожаротушения и мобильной техники, используемой для тушения пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур.

1.3 Средства тушения пожаров на объектах энергетики

В настоящее время вода является самым распространенным и самым часто используемым веществом при тушении пожаров. Преимущества воды в том, что она находится в свободном доступе, обладает высокой теплоемкостью и оказывает сильный охлаждающий эффект на очаг пожара.

При тушении 1 литром воды при нагреве от 0 до 100°C вода поглощает 4189 Дж тепла, а при испарении пар поглощает 2290кДж тепла. Вода обладает повышенной термической стойкостью (свыше 1700°C), превосходя другие огнетушащие вещества [55].

Основной эффект при тушении пожаров водой это охлаждение зоны горения. При попадании воды в зону горения происходит ее нагрев с отбором тепла, после вскипания воды происходит парообразование. Образовавшийся пар продолжает поглощать тепло и увеличивается в объеме в 1700 раз, что способствует вытеснению кислорода из зоны горения, что также приводит к тушению пожара.

При тушении пожаров вода подается сплошными и распыленными струями (величина капель от 100 мкм). С использованием специальных установок

возможна подача тонкораспыленных струй (величина капель до 100 мкм). Практикуется тушение пожаров водяным паром [56].

Однако, несмотря на все преимущества воды в качестве средства пожаротушения, использование ее для тушения объектов энергетики не всегда является целесообразным из-за особенностей горючей нагрузки, размещаемой на этих объектах. Применение водяных струй может привести к ухудшению обстановки на пожаре и непоправимым последствиям.

Кроме того, существует реальная опасность при тушении водой пожаров щелочных и щелочноземельных металлов, так как при взаимодействии их с водой происходит бурное выделение водорода, что приводит к взрыву, а при взаимодействии с горящим магнием и магниевыми элементами происходит реакция разложения воды из-за высокой температуры и также возможен взрыв. При взаимодействии с титаном, серной кислотой, оксидом кальция образуется негорючее вещество, но такая реакция протекает с выделением большого количества тепла и может привести к взрыву и разбрызгиванию агрессивных веществ.

К распространённым огнетушащим веществам относится порошок [57-58].

Огнетушащие порошки представляют собой мельчайше размолотые минеральные соли с добавками, которые помогают уменьшить их слеживание и комкование.

Преимуществом применения установок порошкового пожаротушения являются:

- высокая огнетушащая способность;
- экологическая безопасность (отсутствие токсичных компонентов, озоноразрушающих веществ, низкая коррозионная активность, химическая инертность);
- низкая требовательность к герметичности помещений.

Несмотря на преимущества применения огнетушащих порошков, существуют и недостатки в применении данного вида огнетушащих веществ. Во-первых, ограниченная область применения. Во-вторых, низкая охлаждающая

способность. Также при использовании порошковых огнетушащих составов снижается видимость при тушении в замкнутых объемах. Учитывая эти факторы, для тушения пожаров на объектах энергетики целесообразнее использовать другие огнетушащие вещества, такие как пенные составы, которые обеспечивают более эффективное тушение с минимальным ущербом для оборудования и окружающей среды.

На сегодняшний день при тушении пожаров на объектах энергетики в основном используется пена с различными добавками. Это связано с тем, что основную горючую нагрузку на объектах энергетики составляют горючие жидкости и полимерные материалы, тушение которых затрудняется при применении воды и других огнетушащих веществ.

Пену можно получить несколькими способами. Эти способы стали критерием для классификации пен: химические и воздушно-механические.

Для нужд пожарной охраны чаще всего используют воздушно-механические пены [59-60]. Основным принципом получения таких пен является механическая эжекция воздуха или газа с рабочим раствором пенообразователя. Газ добавляют в смесь постепенно и в небольших количествах и дробят их до получения пузырей малых размеров. Самым простым способом для этого будет опущенная в жидкость труба, через которую подается газ. Пены, полученные таким образом, будут иметь в своей структуре пузырьки одинакового размера, т.е. становятся монодисперсными. Пропускать воздух через жидкость можно самыми разными способами: «барботируя» воздух через жидкость, механическим перемешиванием, встряхиванием, взбиванием. Имеет место и другой способ: рабочим раствором пенообразователя орошают сетку и подают через нее газ.

Ствол под давлением выбрасывает раствор пенообразователя, который затем направляется в виде капель на ячейки сетки и смачивает их. Для формирования пузырьков средней кратности используется поток воздуха, который выдувается струями раствора. А для получения пен высокой кратности, как правило, воздух подается принудительно с использованием вентилятора. Таким образом, процесс формирования пенной структуры включает в себя

несколько этапов, где давление, направление потока и воздействие воздуха являются ключевыми факторами.

Для получения воздушно механической пены (ВМП) используются специальные поверхностно-активные вещества - пенообразователи (ПО).

Пожары происходят на всей территории страны, но как было отмечено ранее, самые затяжные и трудные пожары случаются в регионах с холодными климатическими условиями. На работоспособность рукавных линий и транспортировку огнетушащих веществ по насосно-рукавным системам особенно негативно влияют отрицательные температуры воздуха.

Исследованиями в области тушения пожаров в условиях низких температур занимались многие ученые. В рамках работы научной школы «Разработка, создание и эксплуатация пожарной и аварийно-спасательной техники», сформировавшейся в Академии ГПС МЧС России более 50 лет назад, было проведено много исследований в области обеспечения работоспособности насосно-рукавных систем пожарной техники в условиях низких температур [5-12].

Так, например, М.А. Савин [11] в своих исследованиях изучал проблему работоспособности двигателя пожарного автомобиля. Автором проведены исследования и разработана математическая модель для оценки параметров охлаждения двигателя пожарного автомобиля (ПА) при следовании на пожар. Предложены технические решения и рекомендации по улучшению адаптации двигателей ПА к изменяющимся воздействиям внешней среды.

В работе Е.М. Желвакова [12] определена предельная продолжительность нахождения пожарной техники в условиях низких температур, изучены вопросы особенности эксплуатации АЦ в зимний период. Были теоретически обоснованы и экспериментально проверены способы и средства локальной тепловой подготовки элементов пожарной автоцистерны в режиме ожидания, а также систем активной и пассивной тепловой защиты хладочувствительных элементов в условиях низких температур. Разработаны рекомендации по эксплуатации пожарных автоцистерн в условиях низких температур.

Вопросам работоспособности систем насосных установок пожарных

автоцистерн посвящена работа Г.И. Егорова [13]. В работе были определены условия отказа системы забора воды.

Также одной из проблем тушения пожаров в условиях низких температур является поддержание работоспособности насосно-рукавных систем. Исследования, проведенные М.В. Алешковым [9], выявили основные причины выхода из строя пожарных напорных рукавов в условиях низких температур, была определена интенсивность охлаждения воды в рукавах и время ледообразования в напорных рукавах.

Работы О.В. Двоенко [7] были посвящены исследованиям режимов работы насосно-рукавных систем с диаметром до 150 мм в условиях низких температур. Получены математические зависимости для прогнозирования работоспособности рукавных линий при тушении пожаров с применением в качестве огнетушащего вещества воды и аварийном водоснабжении на объектах энергетики в условиях низких температур.

Проанализировав огнетушащие вещества, применяемые при тушении объектов энергетики, можно сделать вывод о том, что основным средством для тушения пожаров на этих объектах является воздушно-механическая пена, но для охлаждения соседних установок целесообразно применять воду. Применение ВМП не всегда эффективно при тушении пожаров на объектах энергетики при отрицательных температурах. Так как в составе пены большое количество воды, то соответственно при отрицательных значениях температуры она замерзает, что в значительной мере осложняет оперативную обстановку при тушении пожара.

Все проведенные ранее исследования были направлены на изучение в качестве огнетушащего вещества воды. Однако в области тушения пожаров пенами в условиях низких температур ранее исследований не проводилось.

Одним из средств тушения пожаров является компрессионная пена. Пена, полученная данным способом, отличается от воздушно-механической пены своими физическими свойствами.

Анализ существующих научных трудов (Качалов А.А., Синельникова Е.В.,

Грачулин А.В., Федяев В.Д. и др. [15-24]) свидетельствует о широкой изученности вопросов применения компрессионной пены в целом. Вместе с тем, проведенный анализ показал отсутствие комплексных исследований, связанных с отсутствием данных по её эффективной подаче для тушения пожаров на объектах энергетики в условиях отрицательных температур окружающей среды.

В связи с этим возникает научная и практическая необходимость в разработке и исследовании специализированных средств пожаротушения, адаптированных к применению в условиях низких температур. Компрессионная пена, ввиду своих особенностей по эффективности тушения пожаров представляет собой повышенный интерес для проведения исследований в данной области.

1.4 Цель и задачи исследования

Анализ данных о пожарах на объектах энергетики за период с 2014 по 2023 год, а также географическом распределении объектов энергетического сектора позволяют сделать вывод о сложной обстановке при тушении пожаров на энергетических объектах в зимнее время. Исследования, ранее проведенные учеными в данной области, были направлены на обеспечение эффективности работы насосно-рукавных систем, пожарных автомобилей и пожарно-технического оборудования при низких температурах окружающей среды. Для тушения пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур важно использовать специализированную пожарную технику, предназначенную для работы в этих условиях, и специальные огнетушащие вещества для транспортировки по насосно-рукавным системам при отрицательных температурах. Анализ научных работ показал, что вопросы применения пенообразователей при тушении пожаров не изучены в полной мере. Исследования использования компрессионной пены проводились без учета

условий низких температур, либо были направлены на исследование в стационарных условиях без движения.

Основываясь на выявленной проблеме, целью исследования стало определение зависимости охлаждения компрессионной пены от параметров подачи с помощью насосно-рукавных систем в условиях низких температур.

Чтобы достичь поставленной цели в данной работе необходимо было выполнить следующие задачи:

- проанализировать условия тушения пожаров на объектах энергетики и их размещение на территории Российской Федерации;

- разработать специальный измерительный комплекс, программы и методики проведения экспериментальных исследований процесса охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур окружающей среды;

- определить и обосновать математическую модель охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур;

- разработать рекомендации и программный комплекс для предварительного планирования тушения пожаров с учетом особенностей охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур;

- Обосновать технические решения для поддержания работоспособности пожарного автомобиля при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур.

Объект исследования: подача компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики.

Предмет исследования: охлаждение компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур при тушении пожаров на объектах энергетики.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

2.1 Анализ применения огнетушащих пен для тушения пожаров на объектах энергетики

Тушение пожаров является особым физико-химическим процессом. Эффективность действий подразделений пожарной охраны, участвующих в тушении, зависит от многих факторов, таких как слаженность в работе по ликвидации пожара, компетентность управления, а также эффективность и достаточность применяемых огнетушащих веществ [61].

Все вышеописанные аспекты являются научно-техническими, и выбор метода и способа пожаротушения, определение необходимых параметров и способов подачи огнетушащих веществ зависит от условий возникновения пожара, вида и типа пожарной нагрузки, объемов нагрузки, геометрических параметров помещений, тактических возможностей подразделений, участвующих в тушении пожара [62].

В контексте повышения эффективности пожаротушения особое внимание следует уделить применению пенных составов. Пены, обладая комплексом свойств, таких как высокая огнетушащая способность, изолирующие свойства и способность удерживаться на поверхности горящих материалов, являются перспективным средством для борьбы с пожарами различных классов. Их использование позволяет оперативно локализовать и ликвидировать возгорания, минимизируя ущерб и обеспечивая безопасность пожарных. Выбор конкретного типа пены и способа ее подачи должен определяться исходя из вышеупомянутых факторов, таких как тип горящего материала, размеры пожара и тактические возможности подразделения.

В зависимости от способа подачи воздуха технические средства получения пены подразделяются на 2 типа:

- эжектирующие воздух (принцип эжекции);
- с принудительной подачей воздуха в систему (принцип инъекции).

Практический опыт применения пены, полученной по принципу эжекции, показал успешность ее использования в подвалах, трюмах кораблей и на открытых площадках [63].

Устройства с принудительной подачей воздуха имеют большую производительность, достигающую сотни кубических метров пены в минуту. В основном эти пены применяются для быстрого заполнения большого объема с целью вытеснения из него горючих газов.

Среди всех существующих огнетушащих средств на сегодняшний день наиболее подходящим для объектов энергетики является воздушно-механическая пена. Даже пена высокой плотности обладает значительным охлаждающим эффектом, разделяя помещение на секции в процессе тушения. Одновременное охлаждение и изоляция, обеспечиваемые пеной, наилучшим образом способствуют тушению пожара.

При тушении пожаров традиционным способом при помощи воды возможен ряд негативных моментов. Тушение водой приводит ко вторичному ущербу: вода, попадая на предметы и технику приводит их в негодность. При тушении пожаров класса В (горение жидких веществ) эффективность пены сравнительно выше, чем у воды. Это объясняется тем, что пена представляет собой дисперсную систему с газовой фазой, окруженной жидкой или твердой средой дисперсионной фазы, то есть систему, в которой газ окружен поверхностно-активным веществом [64].

Для подачи ВМП при тушении пожаров пожарные подразделения используют специальные пеногенераторы или стволы с насадками [65]. Принцип работы пенных генераторов заключается в том, что водный раствор пенообразователя, поступающий по пожарному рукаву, смешивается с воздухом и вспенивается от соударения о сетку на конце ствола. Одним из основных

параметров, характеризующих пену при подаче через пожарные рукава, является кратность. Кратность пены в соответствии с нормативными стандартами – это отношение объема пены к объему раствора, содержащегося в пене [66]. Кратность является безразмерной величиной и определяется как:

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{р-ра}}}, \quad (2.1)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем полученной пены, м³;

$V_{\text{р-ра}}$ – объем пенного раствора, затраченного на получение пены, м³.

В зависимости от величины кратности получаемую из пенообразователей пену подразделяют на 3 типа: [66]

- низкая ($K \leq 20$);
- средняя ($20 \leq K \leq 200$);
- высокая ($K \geq 200$).

С развитием современных технологий возникла необходимость в средствах пожаротушения, позволяющих заменить традиционную воздушно-механическую пену на более эффективные составы.

Более тридцати лет назад технология получения и применения компрессионной пены начала своё внедрение в процесс тушения пожаров. Сначала эту технологию начали использовать в США, затем она успешно распространилась в Европе, и в настоящее время подобные установки разрабатывают и выпускают уже десятки производителей по всему миру, включая Россию. Растущая популярность компрессионной пены обусловлена тем, что при достаточно невысокой стоимости установок для ее производства она обладает рядом явных преимуществ, позволяющих не только окупить изначальные расходы, но и значительно повысить эффективность тушения пожаров в повседневной практике [67].

Принцип работы установок подачи компрессионной пены (CAFS – Compressed Air Foam Systems) заключается в том, что внутри установки осуществляется смешивание трех компонентов: воды, поверхностно-активного вещества (пенообразователя) и воздуха. При этом воздух поступает в зону

смешивания в сжатом виде, например, от воздушного компрессора или специальных баллонов, что и привело к возникновению названия «компрессионная пена» [67-75].

Основные принципиальные различия между такими установками и традиционными пенными системами, включающими пожарный насос, пеносмесительное устройство и генератор пены, состоят в следующем:

1) в установках для компрессионной пены пеновоздушная смесь образуется внутри самой установки и подается по пожарным рукавам в готовом виде. Это означает, что по рукавам передвигается не раствор пенообразователя, как при использовании воздушно-механической пены, а уже готовая компрессионная пена, удельный вес которой в среднем намного меньше;

2) для компрессионной пены не требуется использование пеногенераторов. Она подается при помощи стволов с гладким отверстием, что обеспечивает более компактную струю пеновоздушной смеси на выходе из ствола и большую кинетическую энергию;

3) в традиционных пенных системах основной параметр пены – ее кратность – обычно остается постоянной и зависит от конструкции пеногенератора. В случае с компрессионной пеной ее кратность может быть широко изменена в пределах от 2 до 20 путем варьирования соотношения количества сжатого воздуха, который подается в камеру пеносмешения по заранее заданному алгоритму к водному раствору пенообразователя.

В соответствии с нормами ГОСТа [76-80], компрессионную пену допустимо применять для борьбы с пожарами твердых веществ (А) и горючих жидкостей (В). В эту категорию входит горение легковоспламеняющихся жидкостей, которые могут быть разлиты на любых поверхностях, в том числе и сложной конфигурации, в многоуровневых и одноуровневых зонах.

При применении в тушении пожаров пена, полученная компрессионным способом, по сравнению с воздушно-механической пеной, которая получается традиционным способом, имеет ряд преимуществ:

- структура компонента имеет высокую однородность, в отличие от других видов пены (рисунок 2.1);
- вспенивание образуется за счет воздействия на раствор пенообразователя воздуха под давлением;
- в компрессионной пене отсутствует пенообразователь в остаточной фазе жидкого вида, то есть наблюдается большая его экономия;
- сравнительно более низкий расход огнетушащего вещества, который составляет 0,7–2 кг/с;
- при рабочем давлении 0,5–0,7 МПа более высокая дальность подачи до 25–30 м;
- высокая адгезионная способность («прилипание») из-за низкого содержания водной составляющей (рисунок 2.2);
- возможность подачи на высоту до 350 м;
- возможность свободного маневрирования ствольщика при тушении пожара из-за низкого веса компрессионной пены;
- низкая теплопроводность из-за содержания в пузырьках воздуха.



Рисунок 2.1 – Структура компрессионной пены



Рисунок 2.2 – Адгезионная способность («прилипание») компрессионной пены

В установках получения и подачи компрессионной пены в основном используется одно- или трехпроцентный пенообразователь, но также допускается использование шестипроцентного. В зависимости от кратности компрессионной пены расходные характеристики меняются. Данные преимущества важны для условий применения на объектах энергетики, в том числе при тушении электроустановок, находящихся под напряжением.

На территории нашей страны применение компрессионной пены для целей пожаротушения находится в начальной стадии развития. Но уже можно говорить об ее эффективности, в том числе при тушении пожаров на объектах энергетики [81-85].

На сегодняшний день установки получения и подачи пены компрессионным способом активно внедряются на объекты энергетики, в основном, для тушения машинных залов.

Впервые мобильные средства пожаротушения с технологией получения и подачи компрессионной пены поставлены на дежурство для защиты ПАТЭС «Академик Ломоносов», которая расположена на Чукотке в Арктической зоне

России. Учитывая суровый климат этого региона, важно исследовать применение компрессионной пены и влияние на ее подачу в условиях низких температур.

В настоящее время не проводились исследования по оценке подачи компрессионной пены и ее охлаждения в условиях низких температур, в том числе и в условиях отрицательных температур окружающего воздуха. Таким образом, это и определяет актуальность проводимого исследования.

2.2 Конструктивные и технические особенности установок получения и подачи компрессионной пены

Технологическое развитие общества обуславливает и развитие технологий пожаротушения, что приводит к появлению новых методов и средств тушения, включая технологии подачи пены. Разнообразные варианты конструкции установок для компрессионной пены используются в настоящее время. Самые простые из них включают в свой состав баллоны со сжатым воздухом под давлением, резервуар для смешивания воды и пенообразователя, пеносмесительную камеру для вспенивания водного раствора пенообразователя сжатым воздухом. Вся система имеет обвязку из запорной и регулирующей арматуры. В итоге после вспенивания по рукавам движется готовая для тушения пена. Такие установки «баллонного» типа используются, в том числе, в стационарных (автоматических) системах тушения пожаров. Такой же принцип используется при создании мобильных систем для тушения пожаров.

Ключевым эксплуатационным недостатком подобных решений является ограниченная продолжительность непрерывной работы, обусловленная фиксированным объемом рабочих емкостей. Необходимость их дозаправки, даже при заблаговременном планировании, приводит к вынужденным перерывам в процессе тушения. Компенсирующим фактором выступает относительно низкая стоимость данных установок. [86]

Более совершенные установки, используемые в мобильной пожарной

технике, могут непрерывно и в больших количествах генерировать компрессионную пену. Новейшие версии этих установок управляются с использованием процессорных устройств, оснащенных программируемыми алгоритмами, что предоставляет им дополнительные возможности и широкий спектр функциональности.

Например, компрессионная пена, получаемая с помощью установки Conti CAFS 15 AT с пеносмесителем DigiDos24, образуется путем введения сжатого воздуха в смесь вместе с пенообразующим средством. Установка Conti CAFS включает мощный компрессор, который независимо от режима работы насосной установки обеспечивает производство компрессионной пены любого вида [87].

Подача воды в установку, как правило, осуществляется от центробежного насоса, штатно смонтированного на пожарной автоцистерне. Альтернативными источниками воды могут выступать иные пожарные автомобили, мотопомпы или гидранты.

Формирование высококачественной компрессионной пены требует строго дозированной подачи трёх её компонентов (вода, воздух, пенообразователь) в пеносмесительную камеру в строгих пропорциях. Последующее интенсивное смешение компонентов в данной камере приводит к получению пенной структуры. Качество получаемой пены детерминировано тремя ключевыми факторами: качеством применяемого пенообразователя, точностью соблюдения пропорционального соотношения «вода-воздух-пенообразователь», обеспечиваемой системой дозирования, конструктивными особенностями пеносмесительной камеры, где осуществляется процесс аэрации (вспенивания).

Каждый из указанных параметров эмпирически исследован. В частности, недостаточная эффективность вспенивания в пеносмесителе приводит к снижению кратности и устойчивости пены. Низкокачественная пена подвержена расслоению уже на этапе транспортировки по рукавным линиям, что проявляется в нестабильной работе ствола с хаотичным выбросом воздуха и частично вспененной жидкости. Аналогичная деструкция пенной структуры наблюдается при нарушении рецептуры, а именно — при избыточной подаче сжатого воздуха

или дефиците пенообразователя [88]. Для лучшего представления сравним внешний вид пены, полученной различными способами (рисунок 2.3).

Двухканальная установка пневматической генерации компрессионной пены состоит из следующих устройств (рисунок 2.4):

- насос для подачи воды в систему;
- компрессор для подачи воздуха;
- бак-ресивер для воздуха;
- система пеносмещения пенообразователя с водой под давлением DIGDOS 24;
- смесительные камеры CAFS (типа МК340) и Sky CAFS (типа МК150) (предназначенные для смешивания пенообразователя, воды и воздуха). [89].

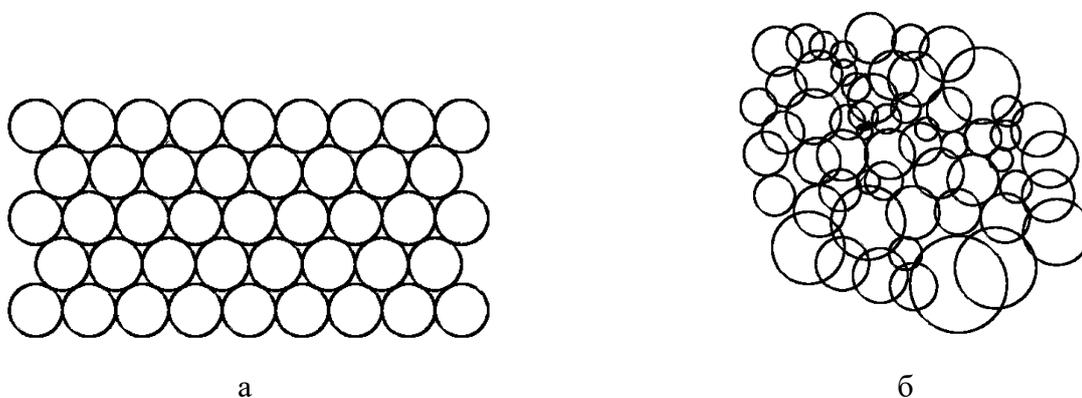


Рисунок 2.3 – Структура компрессионной и воздушно-механической пены:
а – компрессионная пена; б – традиционная воздушно-механическая пена



Рисунок 2.4 – Основные элементы двухканальной пневматической пеногенерирующей установки CAFS и Sky CAFS

Винтовой компрессор Сигма 12 (Sigma 12) в комплекте с баком для масла и воздуха с встроенной в него системой отделения масла от воздуха имеет номинальную производительность 3000 л/мин при давлении 12 бар.

Ресивер (бак) для компрессорного масла и сжатого воздуха имеет объем 21 л. При этом объем масла равен 8 л. Внутри бака имеется система очистки воздуха от масла.

Система пеносмешивания DigiDos 24 оснащена пеноподающим насосом шестеренчатого типа. Степень смешивания: 0,1–6 % от объема воды, минимальный объем подачи пенообразователя 0,5 л/мин. Производительность насоса при подаче пенообразователя может изменяться от 0,5 до 24 л/мин [89].

Расход воды в системе определяется двухдюймовым счетчиком проточной воды типа BSP, выполненным в виде Т-образного переходника, с пределом измерения от 60 до 2400 л/мин.

Расход пенообразователя в системе определяется электромеханическим счетчиком (установленным в корпусе пеноподающего насоса), с пределом измерения от 0,5 до 24 л/мин.

Управление системой пеносмешивания осуществляется посредством электронного модуля (процессора) и дисплея.

Смесительная камера CAFS (типа МК340) предназначена для смешивания воздуха (подаваемого в камеру под давлением 5-6 бар) со смесью, состоящей из воды и пенообразователя. Смесительная камера МК340 оснащена ручным бесступенчатым механическим регулятором внутреннего миксера подачи воды и пенообразователя (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Внешний вид пеногенерирующей установки

Регулятор обеспечивает бесступенчатое дозирование пенообразования с соотношением от 1:2 («мокрая» пена) до 1:20 («сухая» пена).

Функциональная схема, поясняющая общий принцип работы пневматической пеногенерирующей установки системы (CAFS и Sky CAFS), разработанной фирмой Rosenbauer, представлена на рисунке 2.6.

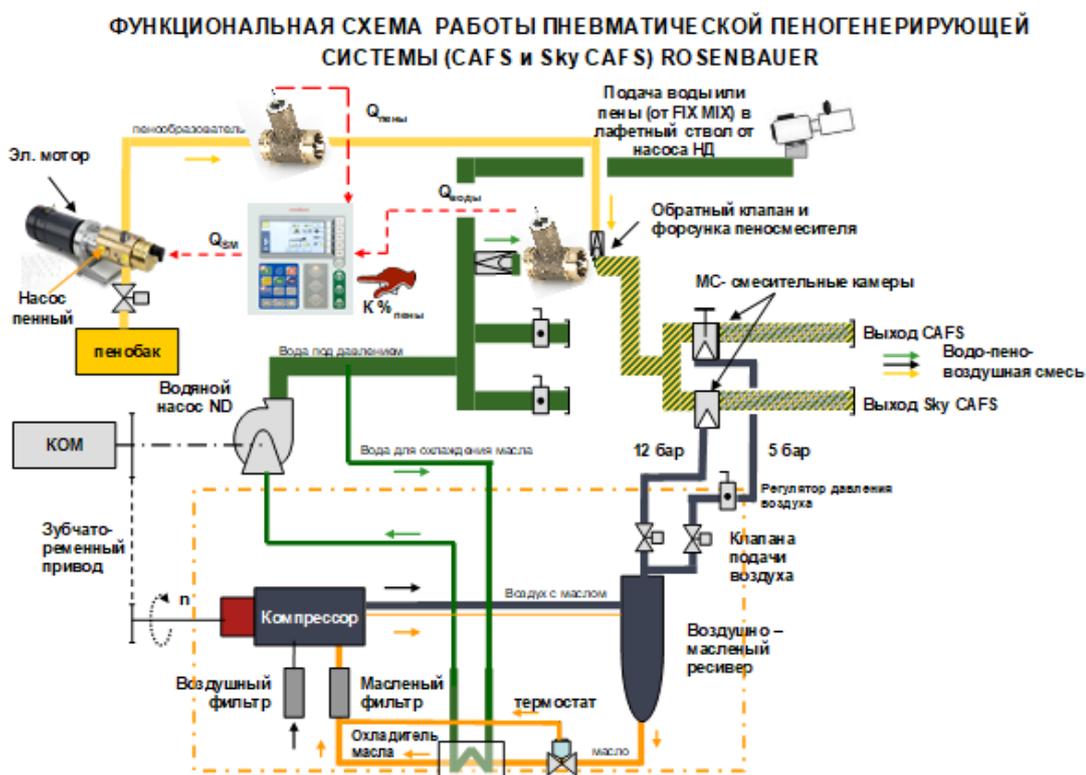


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема работы пневматической пеногенерирующей установки системы (CAFS и Sky CAFS)

Второй по распространенности системой для создания компрессионной пены является установка NATISK. В начале 2012 года в России была запущена серийная производственная линейка автомобилей (УРАЛ, КАМАЗ, ГАЗ), оснащенных системой NATISK, предназначенной для использования на мобильных средствах пожаротушения (рисунок 2.7).

Рассмотрим функциональную схему установки получения и подачи компрессионной пены баллонного типа [90], разработанной фирмой NATISK (рисунок 2.8).



Рисунок 2.7 – Внешний вид установки с технологией получения компрессионной пены баллонного типа

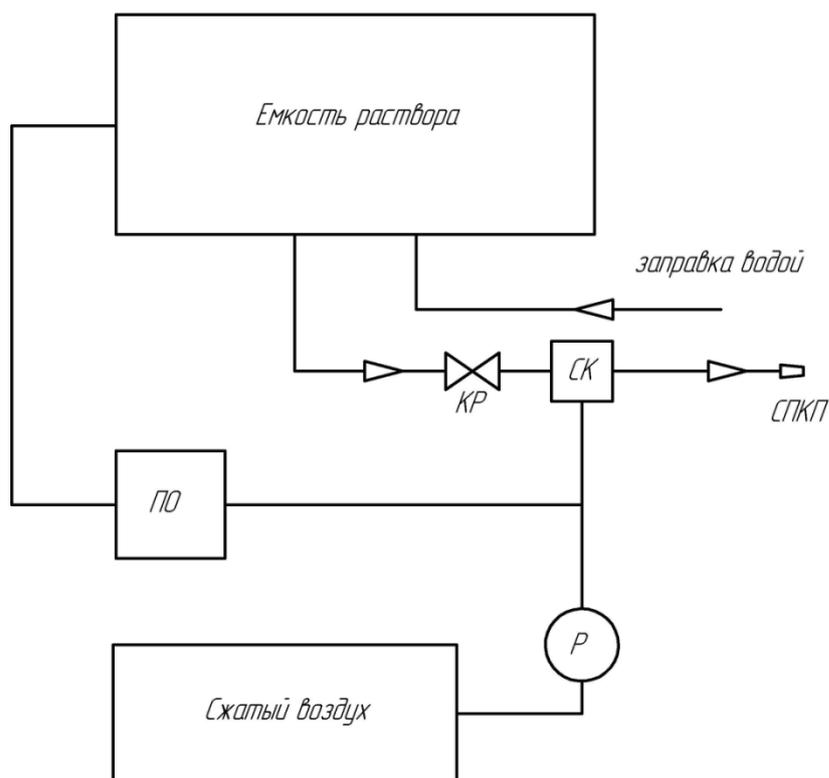


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема работы установки с технологией получения компрессионной пены баллонного типа: СК – смешивающая камера; КР – кран регулировки кратности пены; ПО – пенообразователь; Р – редуктор; СПКП – ствол подачи компрессионной пены

Учитывая, что приведенные выше типы установок получения компрессионной пены, являются наиболее распространенными на мобильной пожарной технике, применяемой в Российской Федерации, дальнейшие исследования были проведены с учетом возможностей этих установок.

2.3 Экспериментальное определение массового расхода компрессионной пены в зависимости от режима работы установки

Один из важных параметров, определяющих охлаждение компрессионной пены – это её массовый расход, который зависит от кратности и режима работы установки. Установки для производства компрессионной пены обычно не

всегда предоставляют возможность регулирования кратности пены, поэтому оценить кратность компрессионной пены можно лишь экспериментальными методами [91].

До настоящего времени не проводились исследования определения кратности и массового расхода пеновоздушной смеси на установках для производства и подачи компрессионной пены, а также не изучалась зависимость этих параметров друг от друга. Для решения этой задачи требовалось разработать методику экспериментальных исследований для определения параметров массового расхода и кратности пеновоздушной смеси при подаче через рукавные системы мобильной пожарной техники в зависимости от режима работы установки [92].

В качестве средства для проведения экспериментальных исследований использовалась автоцистерна пожарная с установкой подачи и производства компрессионной пены АЦ 3,2-40/4 CAFS на базовом шасси КАМАЗ 43253. (рисунок 2.9).

В ходе проведения экспериментальных исследований применялось оборудование, описанное в таблице 2.1.



Рисунок 2.9 – Автоцистерна пожарная с установкой подачи компрессионной пены АЦ 3,2-40/4 CAFS на базовом шасси КАМАЗ 43253

Таблица 2.1 – Оборудование, необходимое для проведения натуральных экспериментов по определению массового расхода компрессионной пены

Наименование	Назначение	Количество
Автомобиль с установкой получения и подачи компрессионной пены	Подача компрессионной пены	1 шт.
Мерная емкость объемом 40 л	Определение массового расхода пены при различных режимах работы установки	4 шт.
Пластиковая емкость объемом 200 л	Определение больших значений массового расхода пены	1 шт.
Весы платформенные	Измерение веса пластиковой емкости с компрессионной пеной	1 шт.
Цифровой фотоаппарат	Фото- и видеofиксация экспериментальных исследований	1 шт.
Рукав DN50 мм длиной 20 м	Подача компрессионной пены	5 шт.
Секундомер	Определение времени заполнения пластиковой емкости компрессионной пеной	1 шт.

Серия экспериментов проводилась в городе Москва при следующих метеорологических условиях:

- температура окружающей среды от +17 до +25 °С;
- скорость ветра от 1 до 5 м/с;
- относительная влажность воздуха от 65 % до 83 %.

Для получения компрессионной пены применялся фторсинтетический пенообразователь типа AFFF 3%.

В соответствии с разработанной программой и методикой исследований на ровной поверхности была развернута рукавная линия 20 метров и установлены платформенные весы для измерения массы пластиковых емкостей объемом 40 и 200 л [83-87].

Эксперименты проводились в следующем порядке:

- 1) производился пуск установки подачи компрессионной пены с различными показателями кратности;
- 2) показатели кратности подаваемой компрессионной пены фиксировались с помощью экспериментального оборудования, и впоследствии проверялись расчетным методом;
- 3) с помощью установки подачи компрессионной пены формировалась струя пены с различными показателями кратности: 2, 10, 20;

4) с помощью перекрывного ствола «DELTA ATTACK 500» (рисунок 2.10) производилась подача компрессионной пены с заданными параметрами при рабочем давлении 0,5 МПа до момента достижения ее стабильного потока (рисунок 2.11);

5) после стабилизации потока струя компрессионной пены без перекрывания направлялась в мерную емкость с одновременным началом фиксации времени заполнения (рисунок 2.12).



Рисунок 2.10 – Общий вид перекрывного ствола «DELTA ATTACK 500, версия CAF»



Рисунок 2.11 – Выход на режим пеногенерирующей компрессионной пены перед заполнением мерных емкостей



Рисунок 2.12 – Последовательность проведения экспериментальных исследований по определению параметров массового расхода: а) заполнение емкостей, б) взвешивание емкостей

Эксперимент проводился не менее 6 раз для каждой кратности пены.

При проведении экспериментальных исследований были получены результаты параметров массового расхода компрессионной пены в зависимости от кратности полученной пены (таблица 2.2).

В ходе проведения исследований была установлена следующая зависимость массового расхода от режимов работы пеногенерирующей установки (рисунок 2.13):

- при кратности компрессионной пены 2 ее массовый расход равен 2,21 кг/с;
- при кратности компрессионной пены 10 ее массовый расход равен 0,95 кг/с;
- при кратности компрессионной пены 20 ее массовый расход равен 0,56 кг/с.

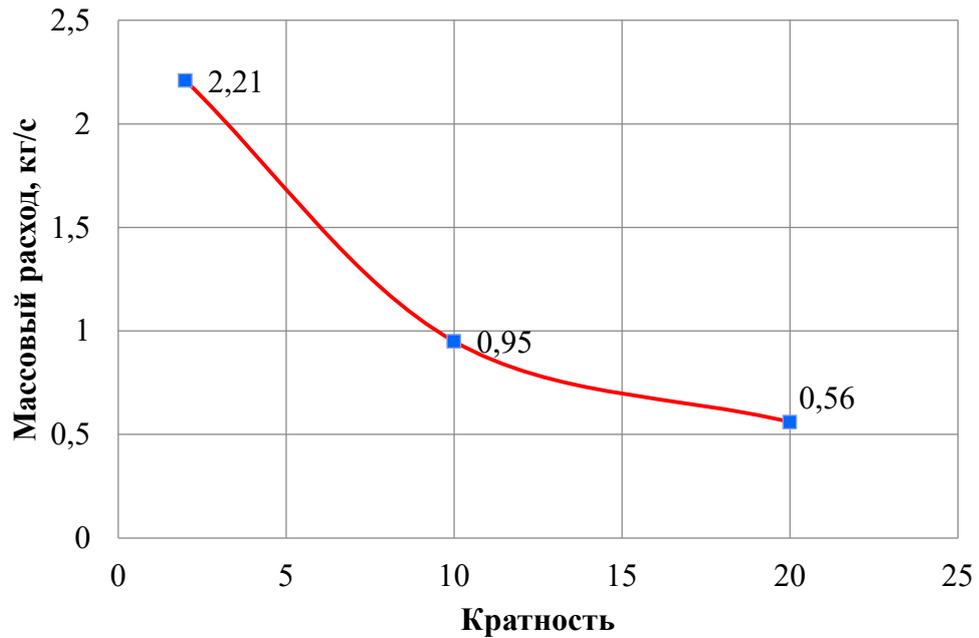


Рисунок 2.13 – Зависимость массового расхода компрессионной пены от кратности

Как видно из приведенного графика, показатель массового расхода в компрессионной пене зависит от ее кратности. Это обусловлено содержанием воздуха в готовой пене: чем выше ее кратность, тем больше содержание в ней воздуха.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментальных исследований по определению параметров массового расхода компрессионной пены в зависимости от различных режимов работы установки

№ измерения	Кратность компрессионной пены	Время заполнения ёмкости, с	Масса компрессионной пены без учета массы бочки, кг	Объем емкости, л	Массовый расход, кг/с
1	2	8,99	19,60	40	2,18
2		8,74	19,40		2,22
3		9,04	19,80		2,19
4		8,86	19,50		2,23
5		8,82	19,30		2,20
6		8,77	19,40		2,21
		Среднее значение массового расхода			2,21
1	10	4,32	4,00	40	0,92
2		4,21	4,10		0,97
3		4,15	3,95		0,95
4		4,27	4,20		0,98
5		4,19	3,98		0,94
6		4,23	4,15		0,98
		Среднее значение массового расхода			0,95
1	20	7,5	4,24	70	0,57
2		7,32	4,22		0,58
3		7,00	4,15		0,59
4		7,38	4,13		0,56
5		7,20	4,10		0,57
6		7,68	4,18		0,54
		Среднее значение массового расхода			0,56

Полученные в ходе экспериментальных исследований параметры массового расхода компрессионной пены, в дальнейшем позволят с помощью математического моделирования оценить охлаждение компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур окружающей среды.

2.4 Экспериментальное определение параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур

2.4.1 Разработка и создание измерительного комплекса для проведения натурных экспериментов

Для изучения процесса охлаждения пены, полученной компрессионным способом при подаче по пожарным напорным рукавам в неблагоприятных метеорологических условиях, в том числе в условиях низких температур окружающего воздуха, был разработан специальный измерительный комплекс [93].

Этот комплекс включает в себя напорные рукавные вставки гофрированного диаметра условного прохода DN50, DN65, DN80 (рисунок 2.14). На обоих концах вставок установлены соединительные головки. Поверхность соединительных вставок обернута специальным теплоизолирующим материалом, чтобы теплопроводность участка вставки приблизилась к теплопроводности материала рукава.

На рукавных вставках смонтированы гаечные соединения, в которые устанавливаются температурные датчики для проведения измерений температуры компрессионной пены, движущейся по пожарным напорным рукавам. Датчик температуры передает показания с помощью специального радиоприемника на приемный прибор. Для питания температурного датчика используются аккумуляторные батареи.



Рисунок 2.14 – Рукавные вставки различного диаметра с измерительным прибором и источником питания

С приемного прибора данные о температуре передаются по радиоканалу к приемному устройству (ноутбуку). Дальность передачи сигнала по радиоканалу достигает не менее 350 м (рисунок 2.15).

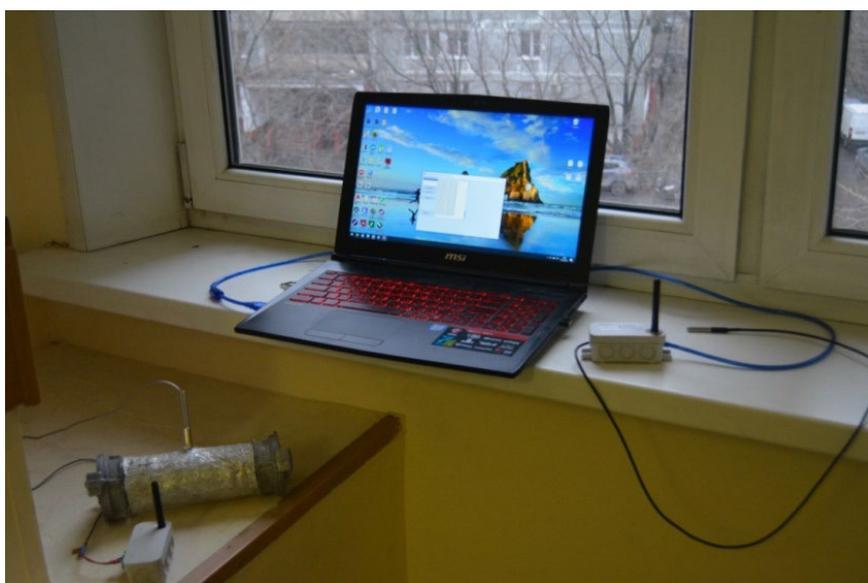


Рисунок 2.15 – Приемное устройство в измерительном комплексе (ноутбук)

Полученные данные фиксируются в специальной программе на ноутбуке (рисунок 2.16).

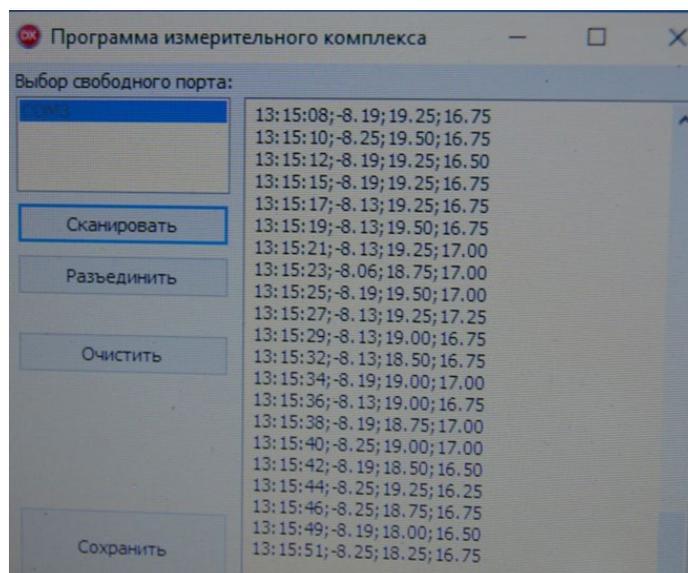


Рисунок 2.16 – Прием данных исследований на ноутбук измерительного комплекса

К приемному устройству подключен еще один температурный датчик, с помощью которого фиксируется температура окружающей среды. Параметры измерений записываются в реальном времени, и данные передаются на приемное устройство (ноутбук). Параметры измерительного комплекса приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики температурных датчиков с приемным устройством

№ п/п	Наименование параметра	Значение		
1	Пределы измерения температуры окружающей среды	От $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$		
2	Погрешность измерений температуры окружающей среды	$\pm 0,5\%$		
3	Пределы измерения температуры в рукавных вставках	От $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$		
4	Тип крепления температурных датчиков к рукавным вставкам	M8		
5	Длина рабочей части датчика температуры	30 мм		
6	Погрешность измерения температуры в рукавных вставках	$\pm 0,5\%$		
7	Расстояние передачи радиосигнала	Не менее 350 м		
8	Типоразмеры рукавных вставок	DN50	DN65	DN80

Для оценки процессов охлаждения пены, полученной компрессионным способом, при ее движении по напорным пожарным рукавам в условиях низких температур использовался разработанный измерительный комплекс. На рисунке 2.17 изображено подключение вставки измерительного комплекса в насосно-рукавную систему при подаче компрессионной пены [83-87].



Рисунок 2.17 – Подключение рукавной вставки с температурным датчиком в насосно-рукавную систему при подаче компрессионной пены

2.4.2. Проведение натуральных экспериментов

Экспериментальные исследования проводились при различных метеорологических условиях на территории Московской области и г. Екатеринбурга. Целью экспериментов была оценка охлаждения компрессионной пены в пожарных напорных рукавах в условиях низких температур. Для проведения таких исследований были разработаны специальная программа и методика.

Принципиальная схема использования измерительного комплекса показана на рисунке 2.18.

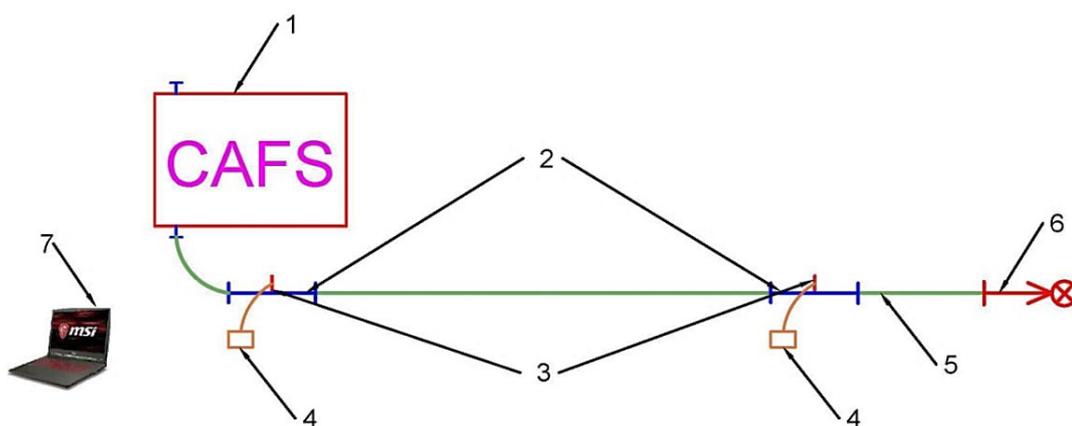


Рисунок 2.18 – Экспериментальная схема исследования оценки охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам:
 1 – установка получения и подачи CAFS; 2 – рукавные вставки;
 3 – температурные датчики; 4 – приемный прибор; 5 – пожарные рукава;
 6 – ствол для подачи компрессионной пены; 7 – приемное устройство (ноутбук)

Первые эксперименты проходили в Московской области с использованием пожарной автоцистерны модели АЦ 3,0-40 «NATISK» на базе шасси МАЗ, оснащенной установкой для получения и подачи компрессионной пены, а также с применением дополнительного оборудования (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Измерительное оборудование для оценки охлаждения компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам в условиях отрицательных температур

Марка, наименование	Назначение	Количество, шт.
Автоцистерна, оснащенная установкой подачи компрессионной пены АЦ 3,0-40 NATISK на базовом шасси МАЗ	Подача огнетушащих веществ	1
Измерительный комплекс для определения параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам	Измерение температурных показателей компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам	1
Весы платформенные	Измерение веса компрессионной пены в пластиковой емкости	1
Цифровая фотоаппаратура	Фото- и видеофиксация экспериментальных исследований	1
Рукав DN 50 мм длиной 20 м	Подача компрессионной пены	1
Рукав DN 50 мм длиной 3 м	Подключение измерительного комплекса	2
Анемометр	Измерение скорости ветра	1
Термометр	Измерение температуры окружающего воздуха	1

Экспериментальные исследования проводились при следующих метеорологических условиях:

- температура окружающей среды от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- скорость ветра – 1–3 м/с;
- относительная влажность воздуха – 50–67 %;
- атмосферное давление от 104,6 до 106,7 кПа.

Экспериментальные исследования выполнялись в следующей последовательности [90]:

- от пожарной автоцистерны с установкой NATISK прокладывался пожарный рукав DN50 длиной 3 м;
- устанавливалась первая рукавная вставка DN50 с температурным датчиком;
- прокладывался пожарный рукав длиной 20 м и устанавливалась вторая рукавная вставка DN50 с температурным датчиком;
- присоединялся пожарный рукав DN50 длиной 3 м и ствол для подачи компрессионной пены (рисунок 2.19).

Производился запуск установки получения и подачи компрессионной пены. В соответствии с руководством по эксплуатации установки производилась настройка параметров кратности получаемой компрессионной пены (рисунок 2.20).

После установления стабильного режима работы с помощью измерительного комплекса фиксировалась температура в режиме реального времени [94]. Результаты экспериментальных исследований сводились в оценочные таблицы (Приложение А).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.19 – Порядок проведения экспериментов:

- а) расположение воздушного баллона и регулировочного крана; б) первая рукавная вставка с температурным датчиком при входе в рукавную линию;
- в) регулировочный кран для установки режима работы установки;
- г) проложенная рукавная линия длиной 20 м со второй рукавной вставкой с температурным датчиком при выходе из рукавной линии



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.20 – Подача компрессионной пены по пожарным рукавам:
а), б) регулирование подачи с помощью ручного ствола;
в) структура полученной пены; г) покрытие пеной вертикальной конструкции

Следующая серия экспериментов проводилась на территории ООО «Завод СПЕЦАВТОТЕХНИКА» с использованием мобильной установки получения и подачи компрессионной пены «NATISK-300 BL» (рисунок 2.21).



Рисунок 2.21– Мобильная установка получения и подачи компрессионной пены «NATISK-300 BL»

Для проведения экспериментальных исследований применялось оборудование, перечисленное в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Экспериментальное оборудование для определения параметров интенсивности охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях отрицательных температур

Наименование	Назначение	Количество, шт.
Мобильная установка «NATISK-300BL»	Получение и подача компрессионной пены	1
Измерительный комплекс для определения параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам	Измерение температурных показателей компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам	1
Пластиковые емкости 65 л	Измерение кратности получаемой пены	3
Весы платформенные	Измерение веса компрессионной пены в пластиковой емкости	1
Цифровая фотоаппаратура	Фото- и видеофиксация экспериментальных исследований	1
Секундомер	Определение времени заполнения пластиковой емкости компрессионной пеной	1
Анемометр	Измерение скорости ветра	1
Термометр	Измерение температуры окружающего воздуха	1
Рукав DN 50 мм длиной 20 м	Подача на расстояние компрессионной пены	1
Рукав DN 50 мм длиной 3 м	Подключение измерительного комплекса	2

Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях:

- температура окружающей среды $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- скорость ветра 1–5 м/с;
- относительная влажность воздуха 50–67 %;
- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа.

Перед началом эксперимента проводилась предварительная подготовка измерительного оборудования и установки (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Подготовка к проведению экспериментальным исследованиям по определению охлаждения компрессионной пены при подаче от мобильной установки «NATISK BL-300»

Экспериментальные исследования (рисунок 2.23) проводились в соответствии с разработанной методикой при различных показателях кратности компрессионной пены. Все результаты исследований заносились в таблицы и в последующем анализировались.



Рисунок 2.23 – Подача компрессионной пены по рукавной линии при температуре воздуха $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

При проведении экспериментальных исследований при остановке установки перекрывной ствол быстро замерзал (рисунок 2.24).

В ходе экспериментов наблюдалось, что изменение основных параметров компрессионной пены значительно влияет на ее охлаждение при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур [95-96]. Экспериментально было подтверждено, что в системах получения и подачи компрессионной пены баллонного типа давление в системе влияет на кратность пены и режим работы установки. Под режимом работы понимаются соотношение параметры кратности, массового расхода и начальной температуры компрессионной пены. Чем больше давление в системе, тем выше кратность компрессионной пены. Результаты экспериментальных исследований сведены в таблицу 2.6.



Рисунок 2.24 – Внешний вид перекрывного ствола после подачи по насосно-рукавным системам компрессионной пены при температуре воздуха $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 2.6 – Результаты проведенных исследований при подаче компрессионной пены на 20 метрах рукавной линии при температуре воздуха $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Номер эксперимента	Режим работы установки	Время заполнения емкости, с	Масса КП без учета массы бочки, кг	Массовый расход, кг/с	Фактическая кратность	Средняя фактическая кратность	Плотность, кг/м ³	Давление на установке, атм	Интенсивность охлаждения, °С
1	9	8,00	10,20	1,28	6,42	6,20	156,92	4	1,92
2		6,50	8,96	1,38	7,32		137,85		1,84
3		9,00	13,46	1,50	4,86		207,08		1,62
Средний массовый расход 1,38 кг/с					Среднее охлаждение 1,78 °С				
1	7	5,80	8,94	1,54	7,33	7,17	137,54	4	1,67
2		9,30	9,44	1,02	6,94		145,23		1,66
3		7,30	9,08	1,24	7,22		139,69		2
Средний массовый расход 1,26 кг/с					Среднее охлаждение 1,79 °С				
1	5	10,33	10,42	1,01	6,29	7,47	160,31	4	2,32
2		8,20	8,71	1,06	7,53		134,00		2,3
3		8,50	7,64	0,90	8,60		117,54		2,49
Средний массовый расход 0,99 кг/с					Среднее охлаждение 2,37 °С				
1	3	15,30	6,16	0,40	10,69	9,20	94,77	4	5,18
2		9,40	8,02	0,85	8,18		123,38		2,78
3		11,40	7,52	0,66	8,73		115,69		3,43
4		16,30	4,58	0,28	14,44		70,46		7,07
5		10,00	8,58	0,86	7,55		132,00		2,72
Средний массовый расход 0,61 кг/с					Среднее охлаждение 4,23 °С				
1	3	9,00	6,06	0,67	10,87	11,66	93,23	7	3,51
2		8,60	5,52	0,64	11,94		84,92		3,7
3		9,00	5,42	0,60	12,17		83,38		3,91
Средний массовый расход 0,64 кг/с					Среднее охлаждение 3,7 °С				
1	3	10,00	8,92	0,89	7,35	8,02	137,23	10	2,64
2		11,00	8,00	0,73	8,20		123,08		3,14
3		11,00	7,72	0,70	8,51		118,77		3,26
Средний массовый расход 0,77 кг/с					Среднее охлаждение 3,01 °С				

Продолжение табл. 2.6

Номер эксперимента	Режим работы установки	Время заполнения емкости, с	Масса КП без учета массы бочки, кг	Массовый расход, кг/с	Фактическая кратность	Средняя фактическая кратность	Плотность, кг/м ³	Давление на установке, атм	Интенсивность охлаждения, °С
1	9	6,00	12,02	2,00	5,44	5,85	184,92	7	1,29
2		5,00	11,18	2,24	5,85		172,00		1,22
3		5,00	10,48	2,10	6,25		161,23		1,26
Средний массовый расход 2,11 кг/с					Среднее охлаждение 1,25 °С				
1	3	12,00	8,28	0,69	7,92	7,98	127,38	7	3,26
2		13,30	8,20	0,62	8,00		126,15		3,54
3		14,40	8,18	0,57	8,02		125,85		3,77
Средний массовый расход 0,62 кг/с					Среднее охлаждение 3,52 °С				

При использовании мобильной установки "NATISK BL-300" были проведены экспериментальные исследования, в результате которых было установлено, что массовый расход изменяется в зависимости от режима работы пеногенерирующей установки (рисунок 2.25).

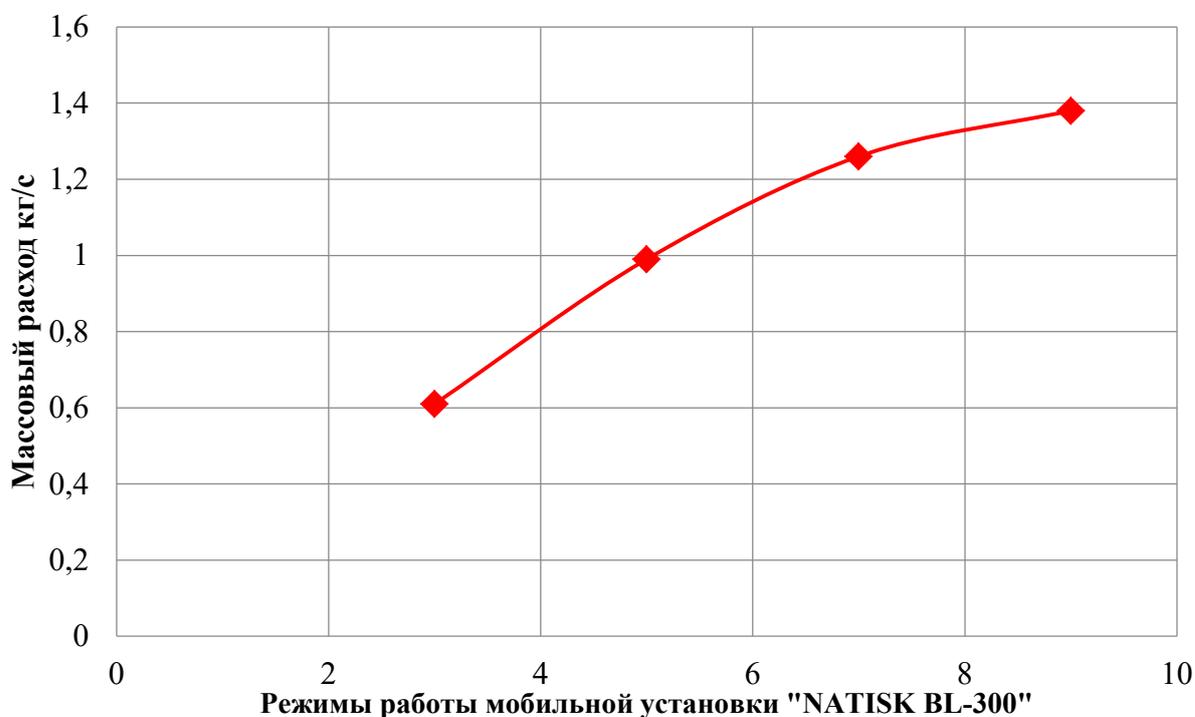


Рисунок 2.25 – Зависимость массового расхода от режимов работы мобильной установки «NATISK BL-300» при давлении 4 атм.

В результате эксперимента было установлено, что при подаче компрессионной пены кратностью 3–6 охлаждение пены было меньше, чем у пены кратностью 8–12.

Так, охлаждение пены кратностью 3–6 при температуре окружающей среды от минус 30 до минус 24 °С составило 1,25–2,5 °С на 20 метрах длины рукавной линии соответственно.

При прочих равных условиях охлаждение компрессионной пены кратностью 8–12 составило 2,8–4,9 °С на 20 метрах длины рукавной линии.

В ходе экспериментальных исследований были получены данные по охлаждению компрессионной пены:

- при кратности компрессионной пены 10 по длине рукавной линии 20 метров изменение температуры составило 2,42 °С. Температура окружающей среды составляла минус 14,49 °С;

- при кратности компрессионной пены 2 по длине рукавной линии 20 метров изменение температуры составило 1,78 °С. Температура окружающей среды составляла минус 14,18 °С.

Результаты экспериментов демонстрируют, что значение охлаждения изменяется в зависимости от степени сжатия пены и режима работы системы. Чем ниже степень сжатия пены в насосно-рукавных системах, тем ниже охлаждение вдоль рукавной линии (Приложение Б).

2.5 Математический анализ результатов экспериментальных исследований по оценке охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур

В процессе исследований была сформулирована цель теоретического описания эффекта охлаждения компрессионной пены при передаче через насосно-рукавные системы в условиях низких температур окружающей среды. Для решения этой задачи была предложена математическая модель, описывающая процесс охлаждения компрессионной пены при ее подаче по пожарным рукавам в условиях низких температур окружающей среды. Эта модель позволяет определить:

- предельные расстояния охлаждения компрессионной пены до 0 °С при использовании насосно-рукавных систем;
- конечную температуру пеновоздушной смеси при подаче через пожарные рукава;
- охлаждение компрессионной пены в зависимости от кратности при использовании насосно-рукавных систем в условиях низких температур.

Рассматриваемая модель охлаждения основана на уравнении теплового баланса, которое имеет вид [97]:

$$\rho_{\text{кп}} C_{\text{кп}} U_{\text{ср}} \frac{dT}{dx} = \frac{K}{R} (T_{\text{ос}} - T_{\text{н}}), \quad (2.2)$$

где $C_{\text{кп}}$ – значение теплоемкости компрессионной пены, Дж/(кг·°С);

$U_{\text{ср}}$ – средняя скорость компрессионной пены в рукаве, м/с;

$T_{\text{ос}}$ – температура окружающего воздуха, °С;

$T_{\text{н}}$ – температура компрессионной пены при входе в рукавную линию, °С;

X – длина исследуемого участка пожарного рукава, м

R – внутренний радиус рукава, м;

K – коэффициент теплопередачи от внешней среды до пены при течении в рукаве:

$$\frac{1}{K} = \frac{\delta}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (2.3)$$

где δ – толщина стенки исследуемого рукава, м;

λ_p – коэффициент теплопроводности материала рукава, Вт/(м²·град);

α_1 – коэффициент теплоотдачи от потока пены к поверхности пожарного рукава, Вт/(м²·град);

α_2 – коэффициент теплоотдачи от поверхности пожарного рукава к окружающей среде, Вт/(м²·град).

В представленной математической модели охлаждения компрессионной пены используется следующее начальное условие:

$$T_{x=0} = T_{\text{тек}}. \quad (2.4)$$

В начальной точке начальная температура равна $T_{\text{н}}$.

В модели охлаждения компрессионной пены при движении в насосно-рукавных системах в условиях низких температур используются следующие допущения:

1) теплопроводность пены не изменяется по длине рукавной линии и считается постоянной, так как такие изменения не значительны;

2) фазовые превращения в компрессионной пене отсутствуют;

3) средняя скорость потока не изменяется в процессе движения. При передвижении компрессионной пены через насосно-рукавные системы скорость потока меняется незначительно, поэтому в данной модели считается, что скорость постоянна;

4) физические свойства пены считаются постоянными по длине рукавной линии и не изменяются в процессе движения.

Решение исходного уравнения (2.1) математической модели движения компрессионной пены при использовании насосно-рукавных систем с учетом начальных условий (2.2) имеет следующий вид:

$$T(x) = T_{oc} + (T_n - T_{oc}) \exp\left(-\frac{2K}{\rho_{кп} \cdot C_{кп} \cdot U_{ср} \cdot R} \cdot X\right), \quad (2.5)$$

Для оценки плотности компрессионной пены используется следующее уравнение:

$$\rho_{кп} = \rho_{вод} \cdot \beta_{вод} + \beta_{возд} \cdot \rho_{возд} \quad (2.6)$$

где $\beta_{вод}$ – объемная доля воды в компрессионной пене;

$\beta_{возд}$ – объемная доля воздуха в компрессионной пене;

$\rho_{вод}$ – плотность воды, кг/м³;

$\rho_{возд}$ – плотность воздуха, кг/м³.

В предложенной формуле плотность пены определяется исходя из массовых долей основных ее компонентов.

Стоит учесть также, что из-за разнородности компонентов компрессионной пены ее теплоемкость необходимо определять аналогичным способом исходя из теплоемкости ее компонентов. Следовательно, формула будет выглядеть следующим образом [87]:

$$C_{кп} = C_{вод} \cdot \beta_{вод} + \beta_{возд} \cdot C_{возд}, \quad (2.7)$$

где $C_{вод}$ – теплоемкость воды в составе пены, Дж/(кг·°C);

$C_{возд}$ – теплоемкость воздуха в пене, Дж/(кг·°C).

Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности пожарного рукава α_1 можно записать так:

$$\alpha_1 = \frac{67 \cdot Nu \cdot \lambda_1}{d_1}, \quad (2.8)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности компрессионной пены, Вт/(м·град);

Nu – критерий Нуссельта;

d_1 – внутренний диаметр пожарного рукава, м.

Критерий Нуссельта и число Рейнольдса для компрессионной пены можно записать в следующем виде [87, 88]:

$$Nu_{ж} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}, \quad (2.9)$$

$$Re_{ж} = \frac{U_{ср} \cdot d_1}{\nu}, \quad (2.10)$$

где $Pr_{ж}$ – число Прандтля для компрессионной пены (данные значения берутся усредненными, исходя из параметров основных компонентов компрессионной пены);

Pr_c – число Прандтля для поверхности стенок рукава, омываемых воздухом;

ν – коэффициент кинематической вязкости компрессионной пены, м²/с.

Для определения числа Рейнольдса необходимо рассчитать среднюю скорость потока компрессионной пены по формуле:

$$U_{кп} = \frac{4 \cdot G}{3,14 \cdot \rho_{кп} \cdot d_1^2}, \quad (2.11)$$

где G – массовый расход компрессионной пены через ствол при подаче, кг/с.

Расчетные показатели средней скорости потока компрессионной пены $U_{ср}$ приведем в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Физические параметры компрессионной пены в зависимости от кратности

Кратность	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C , Дж/(кг·°С)	Массовый расход фактический G , кг/с	Массовый расход теоретический G , кг/с
2	500,6	3990	2,03	2,19
3	324,12	3780	1,88	1,89
4	250,9	3570	1,75	1,69
5	200,96	3360	1,62	1,52
6	167,7	3150	1,50	1,39
7	143,9	2940	1,39	1,28
8	126,05	2730	1,29	1,18
9	112,18	2520	1,20	1,09

Продолжение таблицы 2.7

Кратность	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C , Дж/(кг·°С)	Массовый расход фактический G , кг/с	Массовый расход теоретический G , кг/с
10	101,08	2310	1,11	1,02
11	92,01	2100	1,03	0,95
12	84,44	1890	0,96	0,89
13	78,03	1680	0,89	0,83
14	72,55	1470	0,82	0,77
15	68,12	1260	0,77	0,72
16	63,63	1050	0,71	0,68
17	59,95	840	0,66	0,63
18	56,7	630	0,61	0,59
19	53,77	420	0,57	0,55
20	51,14	210	0,53	0,51

Значение коэффициента теплоотдачи от поверхности рукава к воздуху определяется по формуле:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{d_2}, \quad (2.12)$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град);

d_2 – наружный диаметр пожарного рукава, м.

Для воздуха критерий Нуссельта можно записать в следующем виде:

$$Nu_B = 0,25 \cdot Re_B^{0,6} \cdot Pr_B^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr_B}{Pr_c}\right)^{0,25}. \quad (2.13)$$

Число Рейнольдса для воздуха можно записать в следующем виде:

$$Re_B = \frac{v_{cp} \cdot d_2}{\nu_B}, \quad (2.14)$$

где Pr_B – число Прандтля для воздуха;

v_{cp} – скорость потока воздуха, м/с;

ν_B – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Преобразуем выражение (2.3) для коэффициента теплопередачи с учетом его составляющих [52]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\frac{Nu_{ж} \cdot \lambda_1}{d_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\frac{Nu_B \cdot \lambda_2}{d_2}}} = \left(\frac{d_1}{Nu_{ж} \cdot \lambda_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{d_2}{Nu_B \cdot \lambda_2}\right)^{-1}. \quad (2.15)$$

Используя уравнение (2.4) можно определить параметры охлаждения компрессионной пены в зависимости от ее кратности при подаче по пожарным

напорным рукавам в условиях отрицательных температур окружающей среды на различных расстояниях.

Для проверки адекватности моделирования процессов, протекающих внутри пожарных рукавов при подаче компрессионной пены, был проведен ряд расчетных экспериментов с использованием разработанной модели.

Оценка адекватности модели проводилась по следующему алгоритму:

I Расчет прогнозных оценок

Вычисляем сумму квадратов аргумента L_i и функции T_i :

$$\sum_{i=1}^n L_i^2 \text{ и } \sum_{i=1}^n T_i^2. \quad (2.16)$$

Вычисляем сумму произведений аргумента и функции (L_i, T_i) :

$$\sum_{i=1}^n (L_i, T_i). \quad (2.17)$$

Определяем коэффициенты линейной модели:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot \sum_{i=1}^n L_i^2 - \sum_{i=1}^n L_i \cdot \sum_{i=1}^n (L_i \cdot T_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n L_i^2 - (\sum_{i=1}^n L_i)^2}, \quad (2.18)$$

$$a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (L_i \cdot T_i) - \sum_{i=1}^n L_i \cdot \sum_{i=1}^n T_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n L_i^2 - (\sum_{i=1}^n L_i)^2}. \quad (2.19)$$

Вычисляем прогнозные значения исследуемой величины T_i^{\wedge} (линейная)

$$T_i^{\wedge} (\text{лин}) = a \cdot L_i + b. \quad (2.20)$$

II Построение доверительных интервалов для экспериментальных данных температура–время

Особенностью проверки адекватности результатов моделирования является необходимость комплексной оценки временного ряда температуры с учетом рассеивания данных, т. к. структура экспериментальных данных имеет нелинейный характер, поэтому оценку рассеивания значений будем проводить относительно центра по модели

$$T = T_{\text{cp}} \pm \Delta T. \quad (2.21)$$

Оценку величины интервала данных проведем следующим методом с использованием критерия Стьюдента.

Определим стандартную ошибку данных относительно временной прямой:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(t_i + t_{\text{cp}})^2}{A}}, \quad (2.22)$$

$$A = \sum_{i=1}^n (t_i - t_{\text{cp}})^2, \quad (2.23)$$

где n – число точек на временной прямой, в которых производится сопоставление расчетных и экспериментальных данных;

A – промежуточный вычислительный комплекс, мин²;

t_i – значение времени в i -й точке контроля, мин;

t_{cp} – среднее значение времени относительно всех точек контроля экспериментальных данных, мин.

Определяем поправочный коэффициент по значению измерений температуры в точках временной прямой:

$$K = \sqrt{\frac{B}{n-2}}, \quad (2.24)$$

$$B = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{\text{cp}})^2, \quad (2.25)$$

где B – промежуточный вычислительный комплекс, °C²;

T_i – экспериментальное значение температуры в контролируемой точке, °C;

T_{cp} – среднее экспериментальное значение температуры, °C.

Определяем комплексную ошибку данных для зависимости температура–время:

$$Se_i = S_i \cdot K. \quad (2.26)$$

Определяем величину измерительного интервала в каждой i -й точке временной прямой при доверительной вероятности P и количестве степеней свободы k на основе критерия Стьюдента по формуле:

$$\Delta T = Se_i \cdot t_p(P, k), \quad (2.27)$$

где $t_p(P, k)$ – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности P и числе степеней свободы k .

Тогда нижняя точная граница данных температура–время T_{inf} , °С, определяется по формуле [97]:

$$T_{inf} = T_i - \Delta T_i. \quad (2.28)$$

А верхняя точная граница данных температура–время T_{sup} , °С, соответственно:

$$T_{sup} = T_i + \Delta T_i. \quad (2.29)$$

Результаты расчетов по формулам 2.20–2.28 приведены в таблицах 2.8–2.10 и в Приложении В. Графическое представление результатов отображено на рисунках 2.26–2.28 и в Приложении Г.

Проведенные расчеты оценки адекватности модели показали высокий уровень сходимости с доверительной вероятностью $p = 0,95$.

Таблица 2.8 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, \text{м}^2$	$T^2, \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$L \cdot T_{\text{ср.}}, \text{ м} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$(T - T_{\text{ср.}})^2, \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$(L - L_{\text{ср.}}), \text{ }^{\circ}\text{C}$	Линейная, $^{\circ}\text{C}$	$S\Delta, \text{ }^{\circ}\text{C}$	min, $^{\circ}\text{C}$	max, $^{\circ}\text{C}$
1	20	17,99	18,26	18,44	18,23	18,23	400	332,3	364,6	14,67	2500	18,13	1,5	16,8	19,5
2	30	17,36	17,7	17,09	17,38	17,38	900	302,1	521,4	8,88	1600	17,43	1,3	16,3	18,6
3	40	16,51	16,66	16,5	16,56	16,56	1600	274,2	662,4	4,67	900	16,73	1,1	15,8	17,7
4	50	15,6	15,89	15,8	15,76	15,76	2500	248,4	788	1,85	400	16,03	0,9	15,2	16,8
5	60	14,86	15,28	14,84	14,99	14,99	3600	224,7	899,4	0,35	100	15,33	0,9	14,5	16,1
6	70	14,04	14,45	14,24	14,24	14,24	4900	202,8	996,8	0,03	0	14,63	0,9	13,8	15,4
7	80	13,34	13,6	13,61	13,52	13,52	6400	182,8	1081,6	0,77	100	13,93	0,9	13,1	14,7
8	90	12,68	12,85	12,89	12,81	12,81	8100	164,1	1152,9	2,53	400	13,23	1	12,4	14,1
9	100	12,08	12,29	12,01	12,13	12,13	10000	147,1	1213	5,15	900	12,53	1,1	11,6	13,5
10	110	11,43	11,67	11,28	11,46	11,46	12100	131,3	1260,6	8,64	1600	11,83	1,3	10,7	13
11	120	10,77	10,83	10,86	10,82	10,82	14400	117,1	1298,4	12,82	2500	11,13	1,5	9,8	12,5
Среднее	70	14,2	14,5	14,3	14,4	14,4	5900	211,5	930,8	5,5	1000	14,6	1,3	13,6	15,6
Сумма	770	156,7	159,5	157,6	157,9	157,9	64900	2326,9	10239,1	60,4	11000	160,9	12,4	150	171,9

$b = 19,53$ – свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,07$ – коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 2,59$ – стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – доверительная вероятность;

$t_p = 1,83$ – критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 2.9 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, \text{ м}^2$	$T^2, \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$L \cdot T_{\text{ср.}},$ $\text{ м} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$(T - T_{\text{ср}})^2,$ $\text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$(L - L_{\text{ср}}),$ $\text{ }^{\circ}\text{C}$	Линейная, $\text{ }^{\circ}\text{C}$	$S\Delta,$ $\text{ }^{\circ}\text{C}$	min, $\text{ }^{\circ}\text{C}$	max, $\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	20	18,13	17,82	17,85	18,22	17,93	400	321,5	358,6	20,52	2500	17,68	1,8	16,1	19,3
2	30	16,74	16,63	17,46	16,63	16,94	900	287	508,2	12,53	1600	16,78	1,5	15,5	18,1
3	40	15,95	15,88	16,13	15,38	15,99	1600	255,7	639,6	6,71	900	15,88	1,3	14,7	17
4	50	15,02	14,96	15,19	14,33	15,06	2500	226,8	753	2,76	400	14,98	1,1	14	15,9
5	60	14,02	13,88	14,57	13,39	14,16	3600	200,5	849,6	0,58	100	14,08	1	13,2	15
6	70	13,27	13,09	13,48	12,54	13,28	4900	176,4	929,6	0,01	0	13,18	1	12,3	14,1
7	80	12,43	12,33	12,54	11,75	12,43	6400	154,5	994,4	0,94	100	12,28	1,1	11,3	13,2
8	90	11,55	11,6	11,68	11,01	11,61	8100	134,8	1044,9	3,2	400	11,38	1,2	10,3	12,4
9	100	10,77	10,64	11,04	10,29	10,82	10000	117,1	1082	6,66	900	10,48	1,3	9,3	11,6
10	110	9,88	9,97	10,27	9,61	10,04	12100	100,8	1104,4	11,29	1600	9,58	1,5	8,3	10,9
11	120	9,16	9,29	9,42	8,96	9,29	14400	86,3	1114,8	16,89	2500	8,68	1,7	7,2	10,2
Среднее	70	13,4	13,3	13,6	12,9	13,4	5900	187,4	852,6	7,5	1000	13,2	1,5	12	14,3
Сумма	770	146,9	146,1	149,6	142,1	147,6	64900	2061,4	9379,1	82,1	11000	145	14,5	132,2	157,7

$b = 19,48$ – свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,09$ – коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 3,02$ – стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – доверительная вероятность;

$t_p = 1,83$ – критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 2.10 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, \text{ м}^2$	$T^2, \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$L \cdot T_{\text{ср}}, \text{ м} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$(T - T_{\text{ср}})^2, \text{ }^{\circ}\text{C}^2$	$(L - L_{\text{ср}}), \text{ }^{\circ}\text{C}$	Линейная, $^{\circ}\text{C}$	$S\Delta, \text{ }^{\circ}\text{C}$	min, $^{\circ}\text{C}$	max, $^{\circ}\text{C}$
1	20	17,49	17,7	17,72	17,59	17,64	400	311,2	352,8	26,42	2500	17,38	2	15,6	19,1
2	30	16,5	16,51	16,52	16	16,51	900	272,6	495,3	16,08	1600	16,38	1,7	14,9	17,9
3	40	15,17	15,54	15,53	14,75	15,41	1600	237,5	616,4	8,47	900	15,38	1,4	14,1	16,6
4	50	14,17	14,62	14,27	13,7	14,35	2500	205,9	717,5	3,42	400	14,38	1,3	13,2	15,5
5	60	13,14	13,44	13,39	12,76	13,32	3600	177,4	799,2	0,67	100	13,38	1,2	12,3	14,4
6	70	12,18	12,51	12,27	11,91	12,32	4900	151,8	862,4	0,03	0	12,38	1,2	11,3	13,4
7	80	11,18	11,43	11,45	11,12	11,35	6400	128,8	908	1,32	100	11,38	1,2	10,3	12,4
8	90	10,29	10,58	10,37	10,37	10,41	8100	108,4	936,9	4,37	400	10,38	1,3	9,2	11,5
9	100	9,35	9,57	9,58	9,66	9,5	10000	90,3	950	9	900	9,38	1,5	8,1	10,7
10	110	8,46	8,73	8,67	8,98	8,62	12100	74,3	948,2	15,05	1600	8,38	1,7	6,9	9,9
11	120	7,62	7,81	7,85	8,33	7,76	14400	60,2	931,2	22,47	2500	7,38	2	5,6	9,1
Среднее	70	12,3	12,6	12,5	12,3	12,5	5900	165,3	774,4	9,8	1000	12,4	1,7	11	13,7
Сумма	770	135,6	138,4	137,6	135,2	137,2	64900	1818,4	8517,9	107,3	11000	136,2	16,5	121,5	150,5

$b = 19,38$ – свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,1$ – коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 3,45$ – стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – доверительная вероятность;

$t_p = 1,83$ – критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

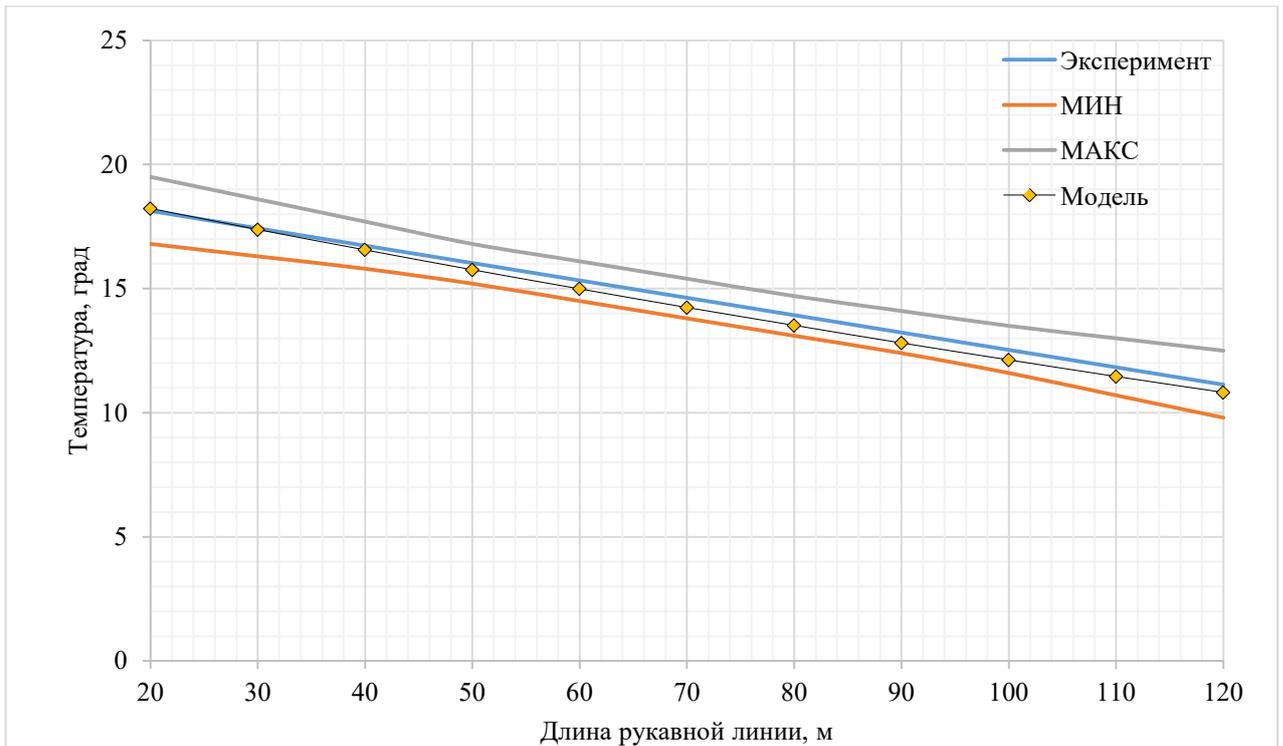


Рисунок 2.26 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

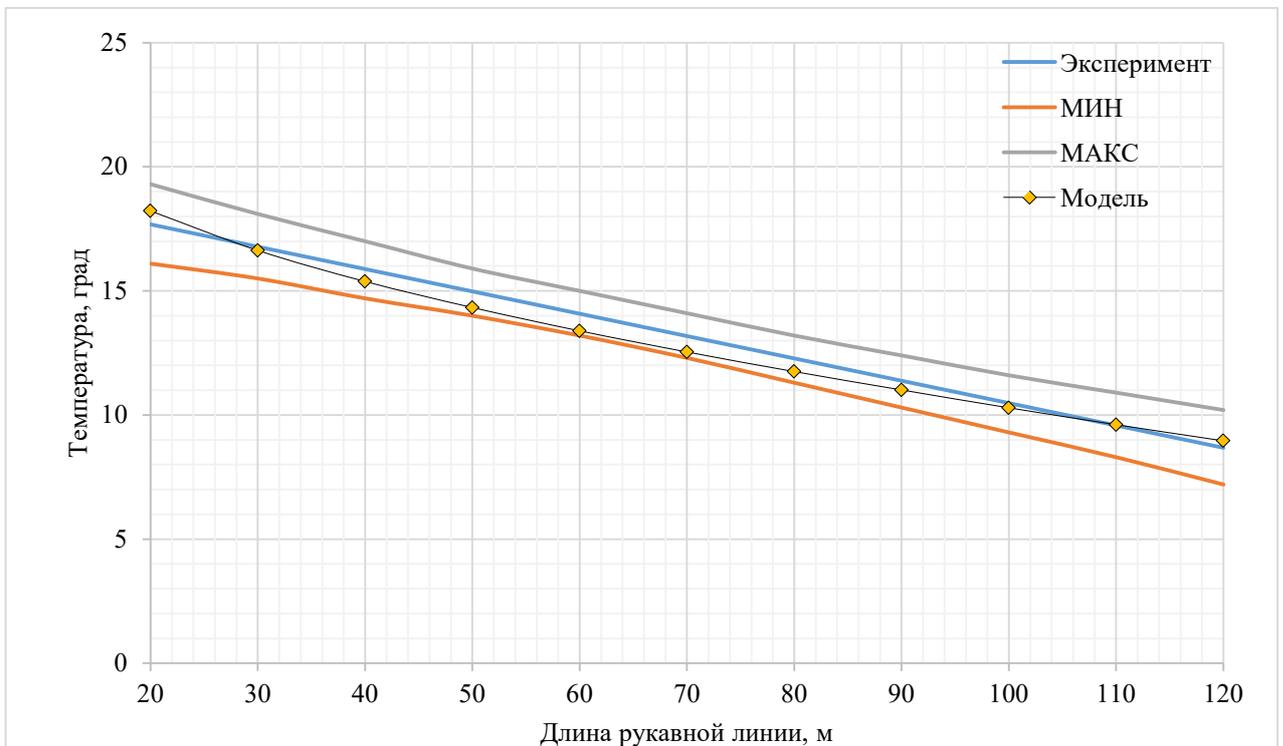


Рисунок 2.27 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

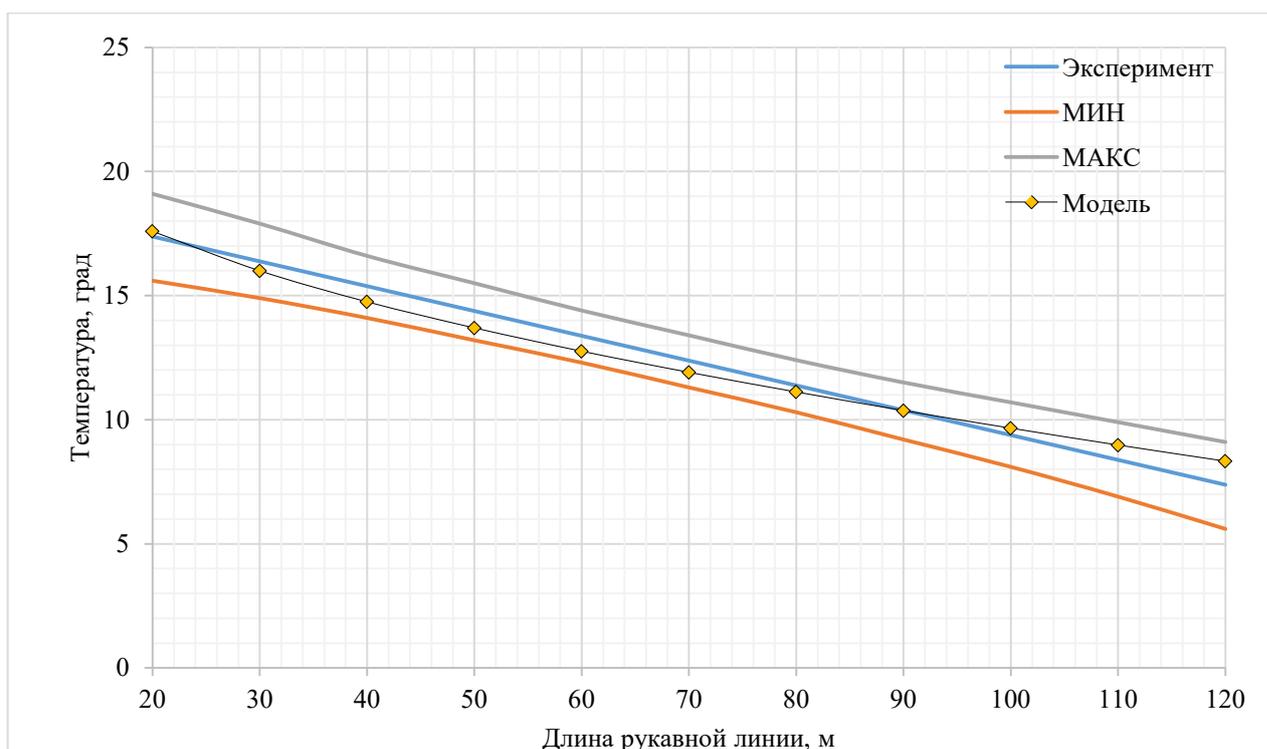


Рисунок 2.28 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

Анализируя данные, представленные на рисунках 2.26–2.28 и в Приложении В, можно сделать следующие выводы:

- расчетные данные по модели близки по значениям средним оценкам экспериментальных данных, и по всей длине рукавной линии содержатся в доверительном интервале;

- максимальное отклонение расчетных данных не выходит за пределы доверительных интервалов, что демонстрирует правильный выбор модели рассеивания экспериментальных данных;

- отклонения расчетных данных от экспериментальных направлены в сторону верхней точной границы, что обеспечивает необходимый запас при моделировании процесса охлаждения компрессионной пены.

Анализ результатов, полученных в ходе экспериментов по оценке охлаждения компрессионной пены при использовании насосно-рукавных систем в условиях низких температур, выполнялся с использованием метода множественной регрессии. Температура компрессионной пены на выходе из ствола в конце рукавной линии была выбрана в качестве зависимой переменной, а длина насосно-

рукавных систем, кратность пеновоздушной смеси и температура окружающей среды – в качестве независимых. Регрессионный анализ был выполнен методом наименьших квадратов, который минимизирует разницу между суммой квадратов экспериментальных значений и прогнозируемых значений [98-103].

Для анализа данных из генеральной совокупности была проведена выборка максимальных значений охлаждения пены, получаемой компрессионным способом при различных значениях кратности (таблица 2.11).

Таблица 2.11 – Выборка данных для регрессионного анализа

№	Кратность	Длина исследуемого участка, м	Изменение температуры по длине исследуемого участка, °С	Температура окружающей среды, град
1.	2	20	1,05	-10
2.	2	40	2,06	-10
3.	2	60	3,04	-10
4.	2	80	3,98	-10
5.	2	100	4,9	-10
6.	2	20	1,4	-20
7.	2	40	2,75	-20
8.	2	60	4,06	-20
9.	2	80	5,31	-20
10.	2	100	6,53	-20
11.	2	20	1,75	-30
12.	2	40	3,44	-30
13.	2	60	5,07	-30
14.	2	80	6,64	-30
15.	2	100	8,16	-30
16.	10	20	2,58	-10
17.	10	40	4,92	-10
18.	10	60	7,08	-10
19.	10	80	9,06	-10
20.	10	100	10,86	-10
21.	10	20	3,44	-20
22.	10	40	6,58	-20
23.	10	60	9,45	-20
24.	10	80	12,07	-20
25.	10	100	14,47	-20
26.	10	20	4,29	-30
27.	10	40	8,22	-30
28.	10	60	11,81	-30
29.	10	80	15,09	-30
30.	10	100	18,09	-30
31.	20	20	4,05	-10
32.	20	40	7,54	-10
33.	20	60	10,58	-10
34.	20	80	13,2	-10
35.	20	100	15,47	-10

Продолжение таблицы 2.11

№	Кратность	Длина исследуемого участка, м	Изменение температуры по длине исследуемого участка, °С	Температура окружающей среды, град
36.	20	20	5,4	-20
37.	20	40	10,07	-20
38.	20	60	14,11	-20
39.	20	80	17,6	-20
40.	20	20	7,89	-30
41.	20	40	14,54	-30

Была определена зависимость показателей охлаждения компрессионной пены от кратности, расстояния, температуры окружающей среды.

Для этого было принято уравнение регрессии вида:

$$T_B = aL + bK + dT + \ln(L) + \ln(K) + e \ln(T) + c, \quad (2.30)$$

где T_B – температура компрессионной пены на выходе из ствола;

T – начальная температура;

L – длина участка рукавной линии;

K – кратность получаемой компрессионной пены;

a, b, c, d, e – коэффициенты для поправки логарифмической функции. Для определения значений коэффициентов поправки функции необходимо решить систему уравнений:

$$a \sum_{i=1}^n \ln L_i + b \sum_{i=1}^n \ln K_i + c \cdot n = \sum_{i=1}^n \ln I_i$$

$$a \sum_{i=1}^n \ln L_i + b \sum_{i=1}^n \ln K_i \cdot \ln L_i + c \sum_{i=1}^n \ln L_i = \sum_{i=1}^n \ln I_i \cdot \ln L_i$$

$$a \sum_{i=1}^n \ln L_i \cdot \ln K_i + b \sum_{i=1}^n \ln K_i + c \sum_{i=1}^n \ln K_i = \sum_{i=1}^n \ln I_i \cdot \ln K_i$$

Индекс корреляции является аналогом коэффициента корреляции для нелинейной функции:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - M_y)^2}} \quad (2.31)$$

где Y_i – значения, определяемые методом наименьших квадратов, y_i – экспериментальные значения, M_y – среднее значение y .

В результате расчетов по формуле (2.30) были получены индексы корреляции при различных входных данных: $0,87 < R < 0,975$, что означает

наличие выраженной связи при всех входных параметрах (Приложение Г).

После проведения математических расчетов коэффициентов корреляции уравнение расчета температуры компрессионной пены на выходе из ствола будет иметь вид:

$$T_{\text{в}} = 0,1527K + 0,0551L + 0,0481T + 2,4463\ln(K) + 2,9370\ln(L) + 5,1731\ln(T) - 33,8176. \quad (2.32)$$

2.6 Выводы по второй главе

Для проведения экспериментальных исследований по определению охлаждения компрессионной пены были созданы программа и методика для измерения массового расхода и охлаждения пеновоздушной смеси при использовании насосно-рукавных систем, в том числе в условиях низких температур, в зависимости от режима работы пеногенерирующей установки. Были проведены серии натуральных экспериментов для оценки охлаждения компрессионной пены при использовании насосно-рукавных систем в условиях низких температур.

Для экспериментов был разработан и применен комплекс измерительных приборов для оценки охлаждения компрессионной пены при использовании насосно-рукавных систем в условиях низких температур. Этот комплекс позволял решить несколько важных задач, включая:

- определение параметров охлаждения компрессионной пены при использовании рукавных линий в условиях низких температур;
- анализ влияния режимов работы пеногенерирующей установки на охлаждение компрессионной пены при использовании насосно-рукавных систем при отрицательных температурах;
- определение предельной длины рукавной линии для достижения температуры 0 °С при использовании насосно-рукавных систем в условиях отрицательных температур окружающей среды.

По результатам проведенных натурных экспериментальных исследований были получены данные о массовом расходе и значения охлаждения пены, полученной компрессионным способом при подаче ее по насосно-рукавным системам от пожарных автомобилей или мобильных установок пожаротушения в условиях отрицательных температур окружающей среды. Исследования также позволили определить зависимости массового расхода от кратности компрессионной пены.

Для теоретического описания процесса охлаждения компрессионной пены при движении через насосно-рукавные системы была разработана математическая модель. При этом были сделаны и приняты различные предположения для более точных вычислений и подтверждения соответствия представленной модели.

Было произведено сравнение результатов исследований с помощью критерия Стьюдента, который показал адекватность выбранной модели расчета охлаждения компрессионной пены при движении в насосно-рукавных системах в условиях низких температур.

ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о необходимости обеспечения работоспособности рукавных систем при использовании компрессионной пены для снижения возможного ущерба от пожара на объектах энергетики в условиях низких температур. Существующие технические средства, которыми располагают пожарные службы, не всегда обеспечивают полную гарантию тушения пожаров на таких объектах [104].

Поэтому актуальность представляет разработка системы предварительного планирования, учитывающей возможность использования компрессионной пены на различных расстояниях от объектов энергетики.

Это требует создания программного комплекса на основе полученных экспериментальных данных с учетом особенностей охлаждения пеновоздушной смеси при использовании насосно-рукавных систем в условиях низких температур [105].

Результаты предварительного планирования позволят установить технические требования к пожарной технике, обеспечивающей возможность ликвидации пожаров на объектах энергетики, включая применение технологии компрессионной пены. Учитывая сложность планирования и специфику объектов энергетики, для эффективной ликвидации пожаров на таких объектах необходима разработка планов и проектов тушения пожаров для каждого объекта [106].

3.1 Разработка программного комплекса по предварительной оценке возможностей подразделений пожарной охраны по обеспечению работоспособности пожарной техники при подаче компрессионной пены в условиях низких температур

Разработанный программный комплекс предназначен для проведения расчетов температуры охлаждения компрессионной пены по длине рукавной линии в зависимости от кратности на этапе предварительного планирования. Реализация и работа программы возможна по алгоритму, представленному на рисунке 3.1.

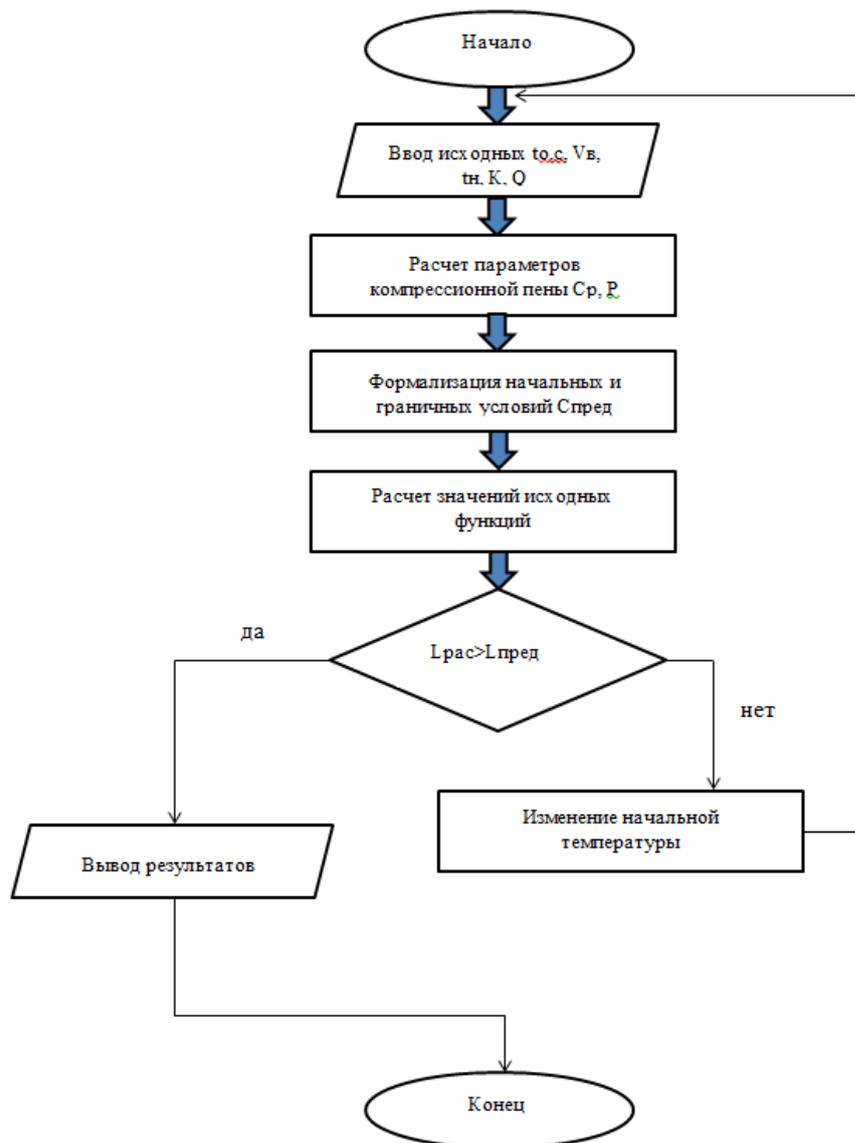


Рисунок 3.1 – Алгоритм программного комплекса

Представленный алгоритм дает возможность с использованием результатов эксперимента определить параметры работоспособности насосно-рукавной системы при подаче компрессионной пены в условиях низких температур воздуха.

Сам программный комплекс разработан и написан на языке программирования Delphi и позволяет определить длину рукавной линии в зависимости от режима работы пеногенерирующей установки, массового расхода и метеорологических условий (Приложение Д).

Программный комплекс по оценке охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур состоит из нескольких блоков:

- ввод данных окружающей среды;
- ввод данных параметров компрессионной пены;
- определение расчетных параметров компрессионной пены, влияющих на охлаждение;
- определение параметров температуры компрессионной пены при выходе из ствола;
- блок вывода данных.

Программный комплекс позволит оценить охлаждение пены при движении по насосно-рукавным системам при отрицательных температурах окружающей среды, что в дальнейшем даст возможность предварительно планировать действия подразделений пожарной охраны (рисунок 3.2). Для удобства применения программного комплекса он реализован в одном рабочем окне.

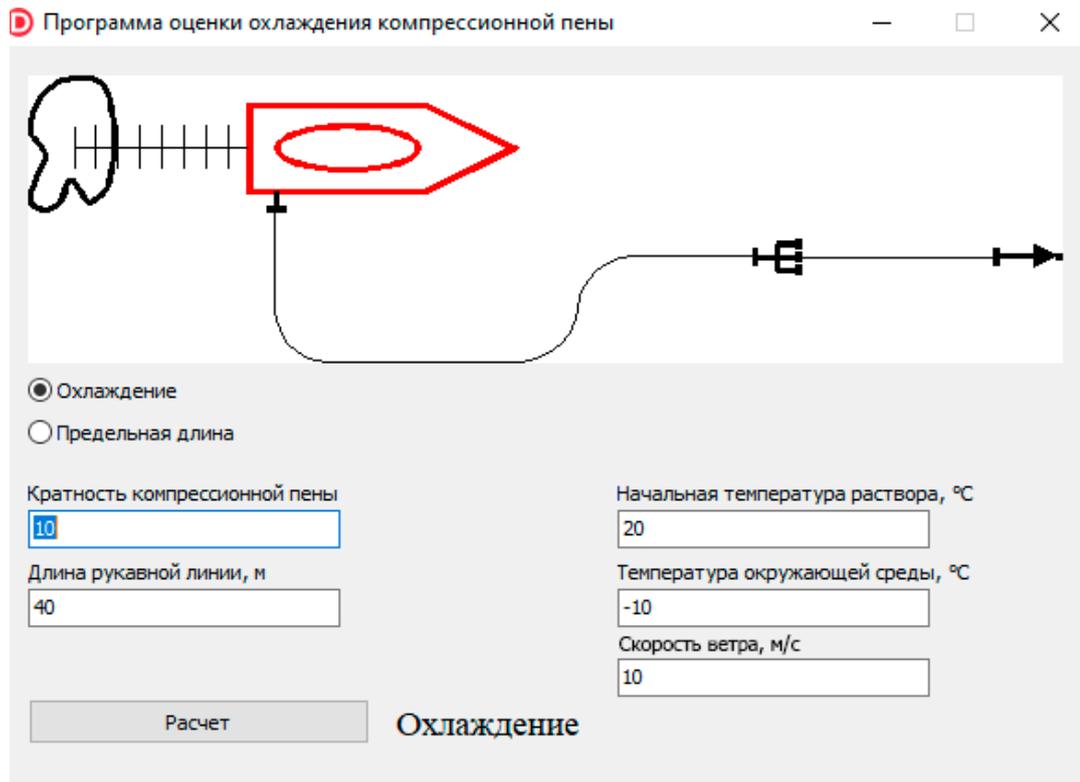


Рисунок 3.2 – Интерфейс программного комплекса по определению охлаждения компрессионной пены

В новый программный комплекс частично включены функции, которые ранее были разработаны для программного комплекса по оценке работоспособности насосно-рукавных систем пожарной техники.

Когда пользователь запускает программу (рисунок 3.2), ему предлагается установить кратность компрессионной пены в диапазоне от 2 до 20, используемой при передаче через насосно-рукавные системы. Затем требуется указать параметры длины рукавной линии, задать начальную температуру раствора, находящегося в насосной установке, а также определить температуру окружающей среды. На основе введенных параметров программный комплекс автоматически выводит информацию об оценке охлаждения компрессионной пены при воздействии низких температур в случае использования насосно-рукавных систем.

С помощью разработанного программного комплекса появляется возможность определения предельной длины насосно-рукавной линии по фактору охлаждения при заданных параметрах.

При запуске программы (рисунок 3.3) пользователю предлагается задать параметры кратности компрессионной пены от 2 до 20, а также начальную температуру пенного раствора. Одним из основных вводимых параметров также является температура окружающей среды и скорость ветра. На основании введенных данных программный комплекс рассчитывает предельную длину насосно-рукавных систем.

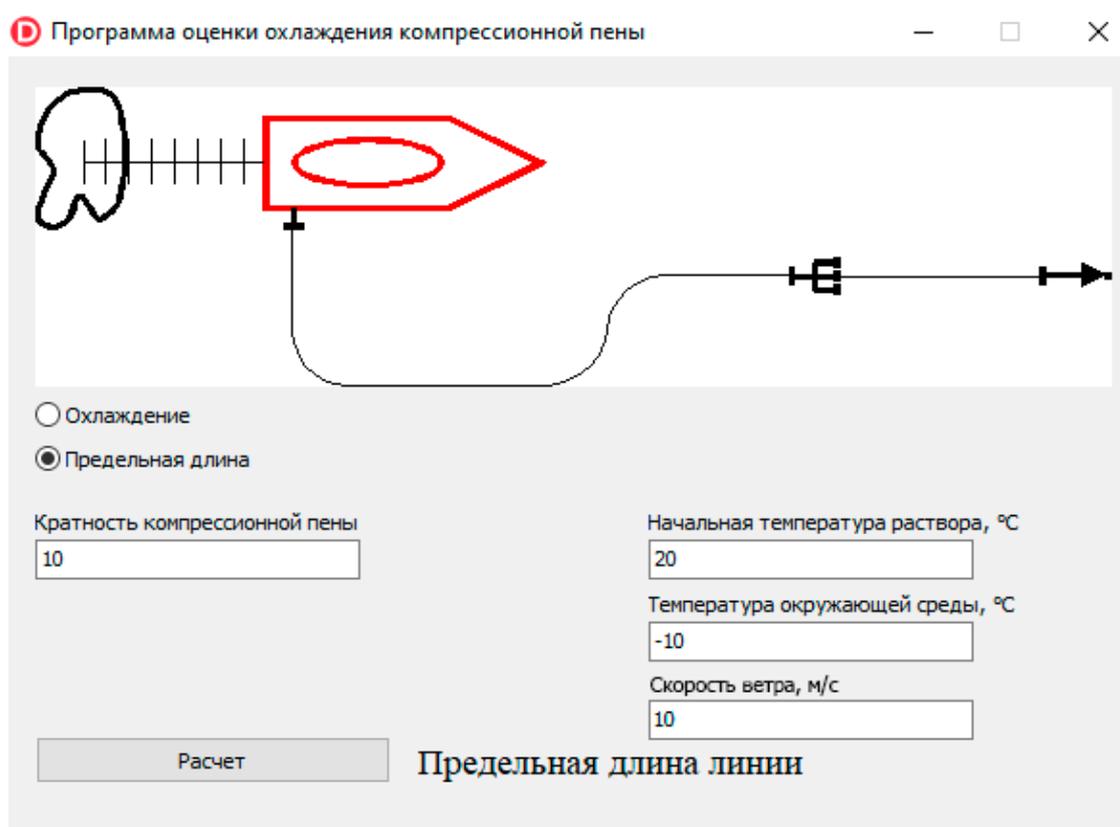


Рисунок 3.3 – Интерфейс программного комплекса по определению предельной длины насосно-рукавной системы при подаче компрессионной пены

На разработанный программный комплекс было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный код и свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ представлены в Приложении Ж.

Разработанный программный комплекс позволит проводить предварительное планирование сил и средств при использовании в качестве огнетушащего вещества компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур.

3.2 Концепция разработки отечественной пожарной автоцистерны с элементами «северного» исполнения, оснащенной системой подачи компрессионной пены для защиты объектов энергетики

Опираясь на результаты выполненного исследования, представляется возможным сформировать основные требования для разработки пожарного автомобиля с системой обеспечения подачи компрессионной пены в условиях низких температур воздуха (рисунок 3.4).

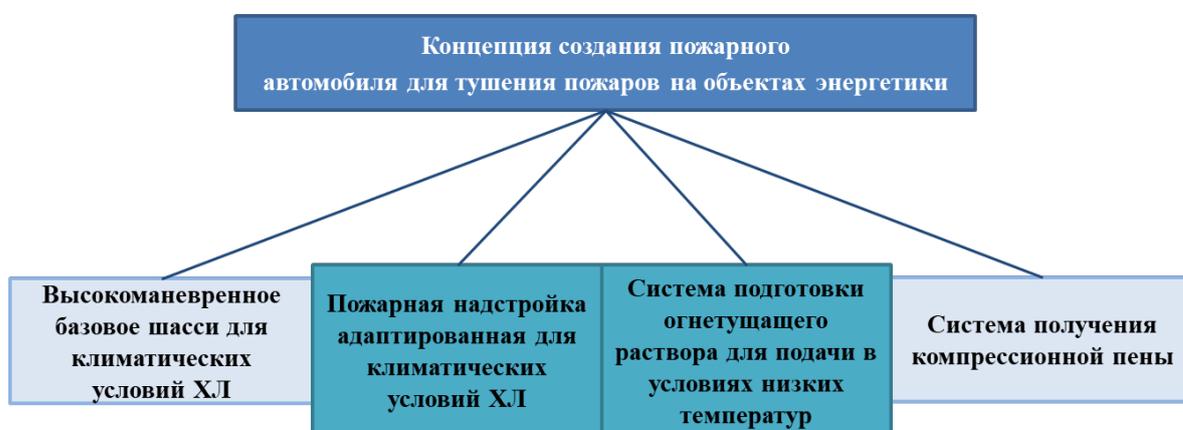


Рисунок 3.4 – Концепция пожарного автомобиля с элементами «северного» исполнения

С учетом тактических возможностей для тушения пожаров наиболее подходящим вариантом является использование пожарной автоцистерны (Рисунок 3.5). Такая автоцистерна предназначена для транспортировки личного состава и огнетушащих веществ на место пожара, выполнения тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных операций как в городах, на промышленных и энергетических объектах, так и на объектах особой важности, включая многоэтажные здания и сооружения. Она также предназначена для перевозки огнетушащих веществ, пенообразующих веществ (ПТВ), сжиженного углекислого газа (СО) и инструментов, а также для подачи огнетушащих веществ из своих емкостей или из других источников в очаг пожара, обеспечивая при этом функционирование насосно-рукавных систем при тушении крупных пожаров при температурах окружающего воздуха до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ продолжительное время. [107-114].



Рисунок 3.5 – Внешний вид пожарной автоцистерны с элементами «северного» исполнения

На шасси размещена кабина для боевого расчета, выполненная из стальных профильных труб, сваренных между собой [115]. Внешние панели сделаны из алюминия и стеклопластика и соединены с использованием современных клеевых технологий. Кроме того, кабина оснащена дополнительным отопительным оборудованием (рисунок 3.6).

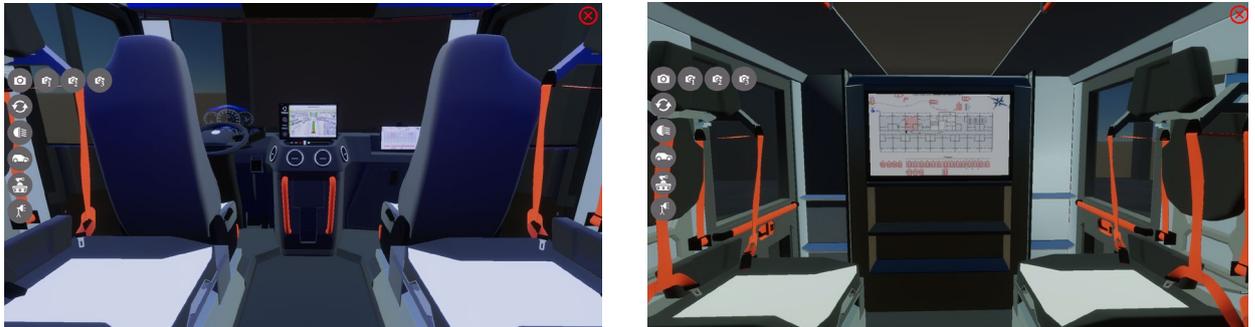


Рисунок 3.6 – Кабина боевого расчета

Пожарная надстройка оборудована утепленными отсеками для размещения пожарно-технического вооружения, специального оборудования и инструмента (рисунок 3.7). На автомобиле возможно разместить емкость для огнетушащих веществ, выполненную из композитных материалов с пониженной теплопроводностью (рисунок 3.8).

Предлагается применение стационарного дистанционно управляемого лафетного ствола-манипулятора в виде стрелы с движением в трехмерной плоскости координат с устойчивой работой в условиях низких температур.

Специально доработанное автомобильное шасси будет оборудовано дополнительной трансмиссией привода насосной установки с вихревым теплогенератором (ВТГ) и системой управления коробкой отбора мощности (КОМ) [116] (рисунок 3.9).

Дополнительная трансмиссия будет обеспечивать на стоянке работу насосной установки с интегрированной системой подогрева воды во всем диапазоне работы насосной установки.

Необходимо предусмотреть системы водопенных коммуникаций с дистанционным управлением, работающие на основе пневматического управления и изготовленные из материалов, устойчивых к коррозии от огнетушащих веществ (рисунок 3.10) [116-119].

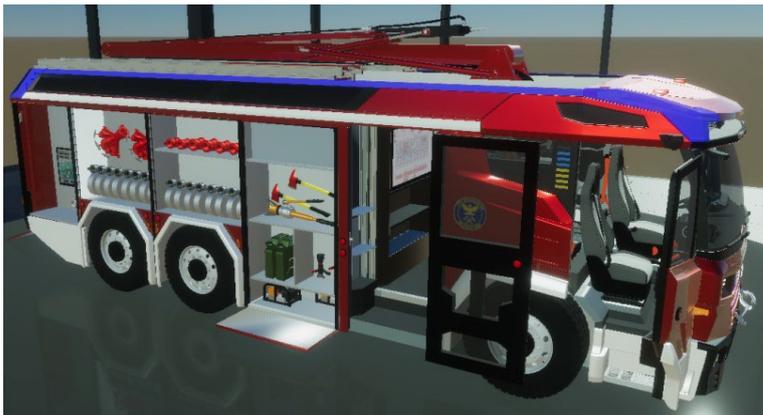


Рисунок 3.7 – 3D модель пожарной автоцистерны с элементами «северного» исполнения



Рисунок 3.8 – Емкость для воды с интегрированным баком для пенообразователя

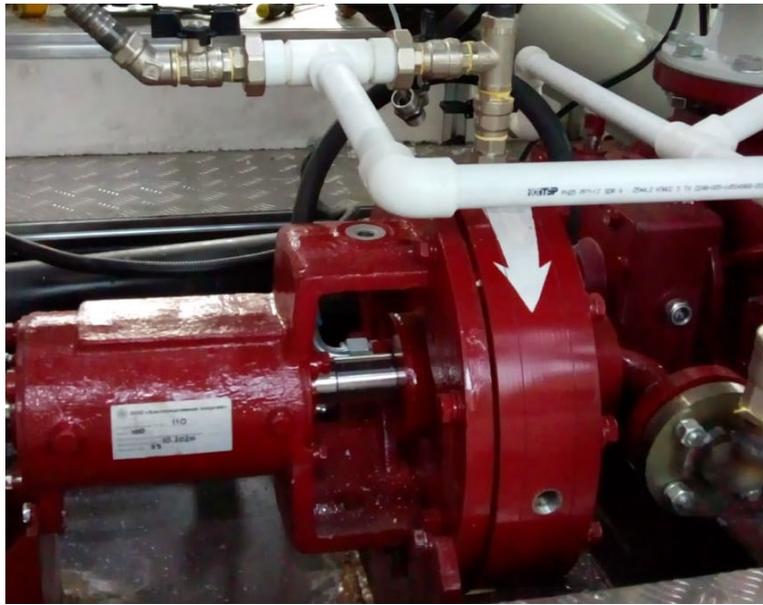


Рисунок 3.9 – Вихревой теплогенератор

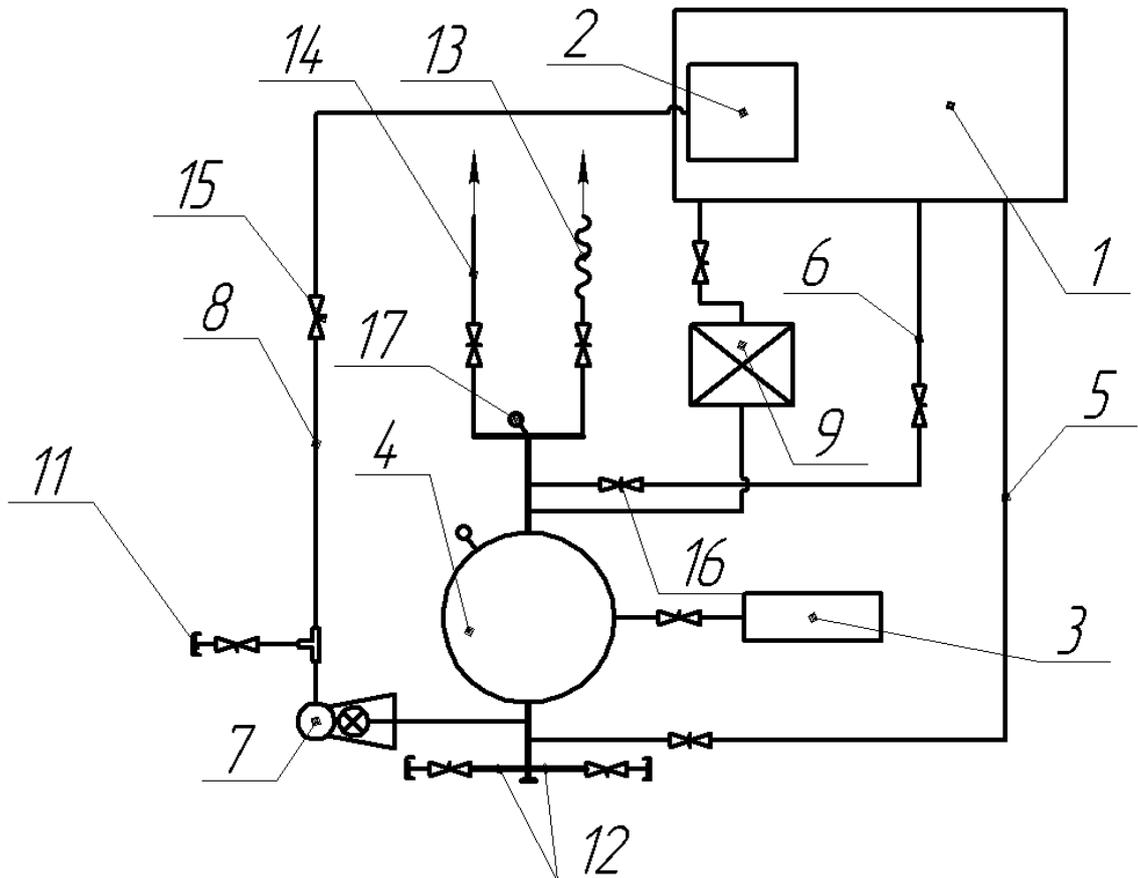


Рисунок 3.10 – Условная схема водопенных коммуникаций:

- 1 – цистерна; 2 – пенобак; 3 – система продувки; 4 – насос;
 5 – подающая магистраль; 6 – обратная магистраль; 7 – регулятор пеносмещения;
 8 – подающая магистраль ОТВ; 9 – ВТГ; 11 – заглушка;
 12 – всасывающая труба; 13 – напорная труба; 14 – лафетный ствол;
 15 – кран; 16 – задвижка; 17 – манометр [120]

При использовании автоцистерны с полным набором оборудования на объектах энергетики будет обеспечиваться выполнение следующих задач:

- доставка на место пожара личного состава подразделений пожарной охраны, огнетушащих веществ, инструмента (подходящего для использования в условиях низких температур) и запасов воды и пенообразователя;

- тушение пожаров и проведение работ по ликвидации чрезвычайных ситуаций в населенных пунктах, на промышленных объектах, на объектах особой важности, включая здания с большим числом этажей и сооружения, с применением транспортируемых на ней средств тушения пожаров, специального инструмента;

- подача ОТВ непосредственно в очаг пожара по магистральным и рабочим рукавным линиям и через стационарный шланговый насос;

- применение пены, полученной компрессионным способом, для тушения пожаров и защиты конструкций в условиях отрицательных температур;

- обеспечение работоспособности насосно-рукавных систем при тушении больших (затяжных) пожаров в условиях экстремально низких температур;

- автоматизированная сборка рукавной линии после ликвидации пожара;

- обогрев персонала и пострадавших в кабине боевого расчета;

- освещение места работ в темное время суток.

3.2.1 Системы получения и подачи компрессионной пены, адаптированные для работы в условиях отрицательных температур воздуха

С целью обеспечения возможности работы с компрессионной пеной в широком диапазоне температур окружающей среды предлагается возможное оснащение автомобиля двумя типами установок.

Первый тип установки стационарный, она постоянно размещается в отсеке автомобиля и состоит:

- из пожарного центробежного насоса нормального давления;

- воздушного компрессора с приводом от двигателя автомобиля;
- ресивера для смешивания компрессорного масла и воздуха;
- радиаторной системы охлаждения компрессорного масла;
- системы принудительного смешивания пенообразователя с водой под давлением;
- смесительных камер для трехкомпонентного смешивания раствора.

Для адаптации к условиям работы в отрицательных температурах отсек с установкой оснащается дополнительными системами воздушного обогрева. Напорные патрубки установки имеют отдельно открывающиеся лючки для подсоединения напорных рукавов. Это не допускает дополнительной потери тепла в отсеке при работе установки.

Каждый из трех компонентов компрессионной пены имеет дополнительные системы подогрева (рисунок 3.11).

Вода предварительно подогревается с помощью вихревого теплогенератора и уже нагретой подается в камеру смешивания. При этом с помощью дозатора возможно регулировать смешивание холодной и горячей воды для получения нужной температуры в зависимости от условий окружающей среды.

Нагрев воздуха происходит за счет работы компрессорной установки.

Для подогрева бака пенообразователя кроме воздушной системы отопления емкостей для огнетушащих веществ, отдельно используется система встроенных электротермоленгт.

Использование этих систем позволяет увеличить первоначальную температуру компрессионной пены при выходе из напорного патрубка, что в свою очередь позволяет увеличить длину рукавной линии в условиях низких температур [121-124].

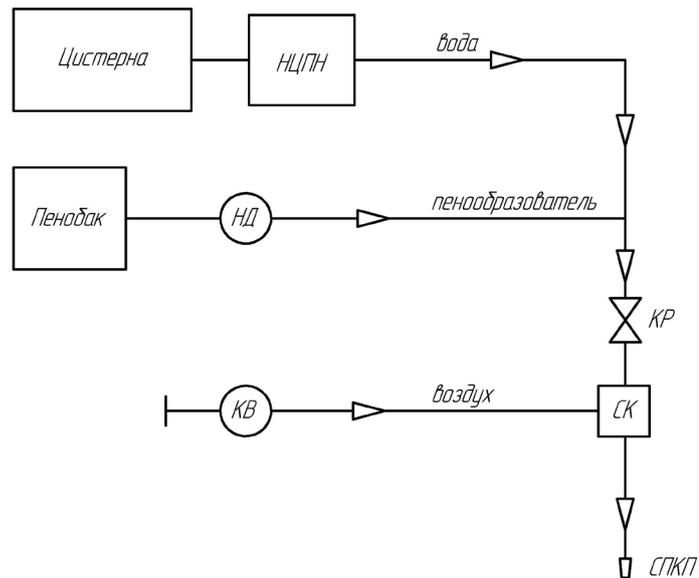


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема пеногенерирующей установки с компрессором: НЦПН – насос центробежный пожарный; НД – насос дозирующей; КВ – компрессор воздушный; СК – смешивающая камера; КР – кран регулировки кратности пены; СПКП – ствол подачи компрессионной пены

Вторая система представляет собой мобильное съемное устройство с системой получения компрессионной пены, адаптированной для работы в условиях отрицательных температур. Общий вид установки представлен на рисунке 3.12.

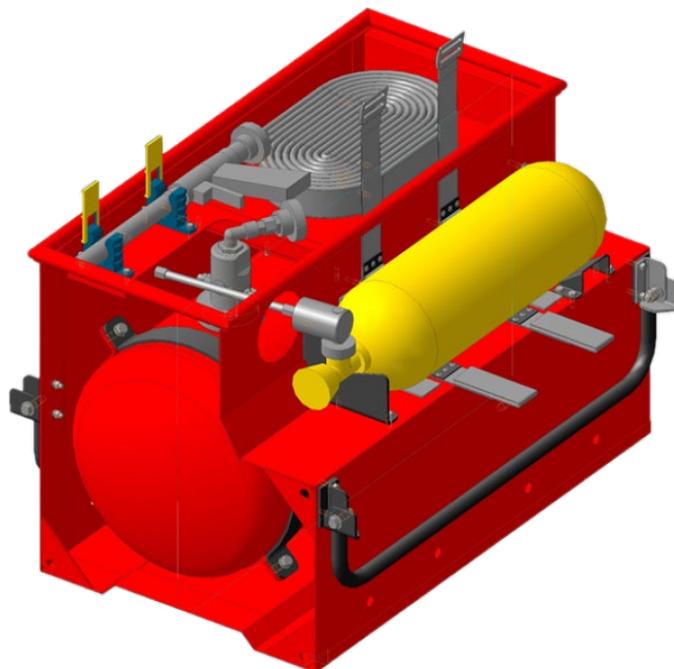


Рисунок 3.12 – 3D модель мобильной установки получения компрессионной пены

Установка состоит из:

- 1) шарового крана подачи воздуха;
- 2) клапана безопасности;
- 3) смесительной камеры;
- 4) шарового крана сброса давления;
- 5) клапана сброса давления;
- 6) манометра рабочего давления;
- 7) редуктора;
- 8) вентиля баллона со сжатым воздухом;
- 9) фланца подключения внешнего баллона со сжатым воздухом;
- 10) манометра давления в баллоне;
- 11) откидной ручки для транспортировки (2 шт.);
- 12) пенобака на 20 л;
- 13) шарового крана стравливания воздуха из насоса подачи пены;
- 14) входного фланца (вода).

При работе установка переносится в подъезд, здание, помещение и т.п. Осуществляется только подпитка водой от автомобиля по пожарным напорным рукавам. Сама установка и бак для пенообразователя находятся внутри помещения, что обеспечивает защиту от негативного воздействия отрицательных температур воздуха [106].

При использовании баллонов объемом 6,8 л при давлении в 300 атм. возможно получить до 2000 л компрессионной пены. Общее время работы до 4 мин.

Применение баллонов объемом 9 л при давлении в 300 атм. позволит получить до 4000 л компрессионной пены. Общее время работы до 5 мин. [107].

Общая масса установки до 75 кг.

3.3 Оценка эффективности предложенных технических решений

Важным аспектом является предварительное планирование использования предлагаемого автомобиля. С применением специально разработанного программного комплекса были определены параметры подачи компрессионной пены разной концентрации для тушения пожаров на объектах энергетики, а также была проведена оценка эффективности предлагаемых технических решений для автомобиля [125-129].

Для оценки возможности подачи компрессионной пены через насосно-рукавные системы при низких температурах был проведен анализ расстояний от водоисточников до зданий атомных электростанций. Такой анализ позволил оценить, насколько эффективно использование компрессионной пены может быть в условиях низких температур для быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации на атомных станциях. Было важно определить предельно возможные расстояния подачи компрессионной пены на имеющиеся расстояния при воздействии низких температур окружающего воздуха с использованием предлагаемых технических решений, а также оценить необходимость подогрева компонентов, входящих в ее состав.

Необходимо было сравнить расстояния при использовании системы подогрева и без нее для таких объектов энергетики, как Кольская и Белоярская АЭС, расположенных в холодных климатических районах России (рисунки 3.13, 3.14).

По результатам предварительной оценки параметров предлагаемых технических решений для тушения пожаров на объектах энергетики необходимые параметры подачи компрессионной пены для тушения пожаров в условиях низких температур воздуха могут быть обеспечены.

Для наглядного представления был построен график сравнения длины насосно-рукавных линий от гидрантов до объекта энергетики и расстояния безопасной работы по фактору обледенения рукавных линий с использованием системы подогрева и без нее при заданных параметрах (рисунок 3.15):

- температура окружающей среды $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- начальная температура смеси без подогрева $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а с подогревом $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- скорость ветра 5 м/с ;
- кратность 10.

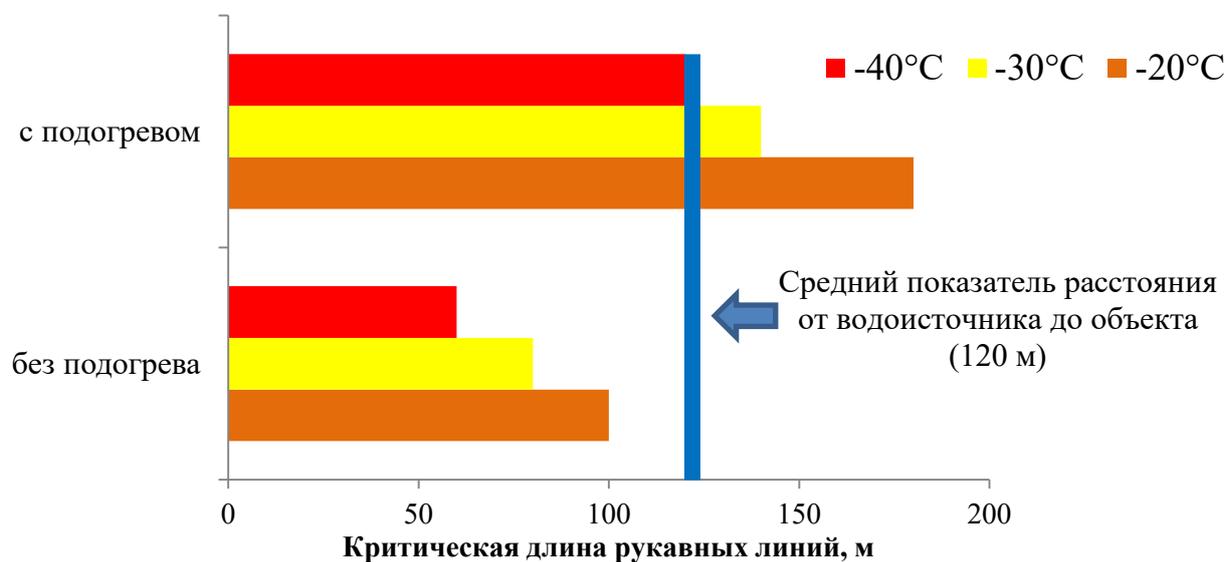


Рисунок 3.13 – Результаты оценки возможности подачи компрессионной пены для тушения пожаров на Кольской АЭС с учетом наиболее часто повторяющихся метеорологических условий

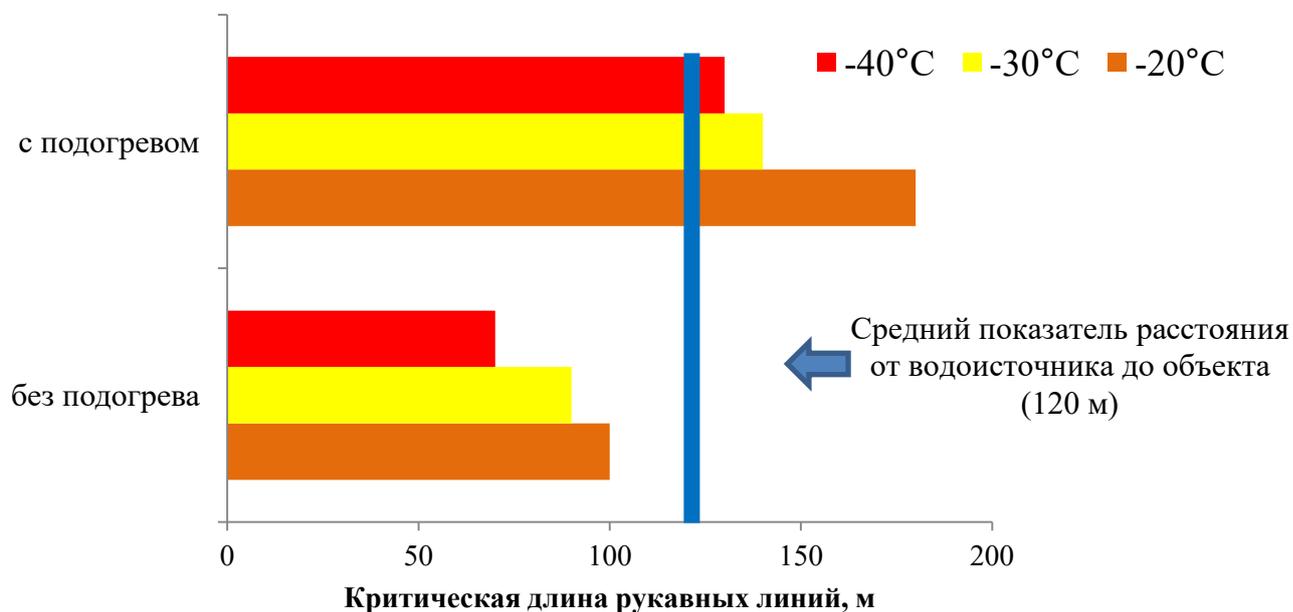


Рисунок 3.14 – Результаты оценки возможности подачи компрессионной пены для тушения пожаров на Белоярской АЭС с учетом наиболее часто повторяющихся метеорологических условий

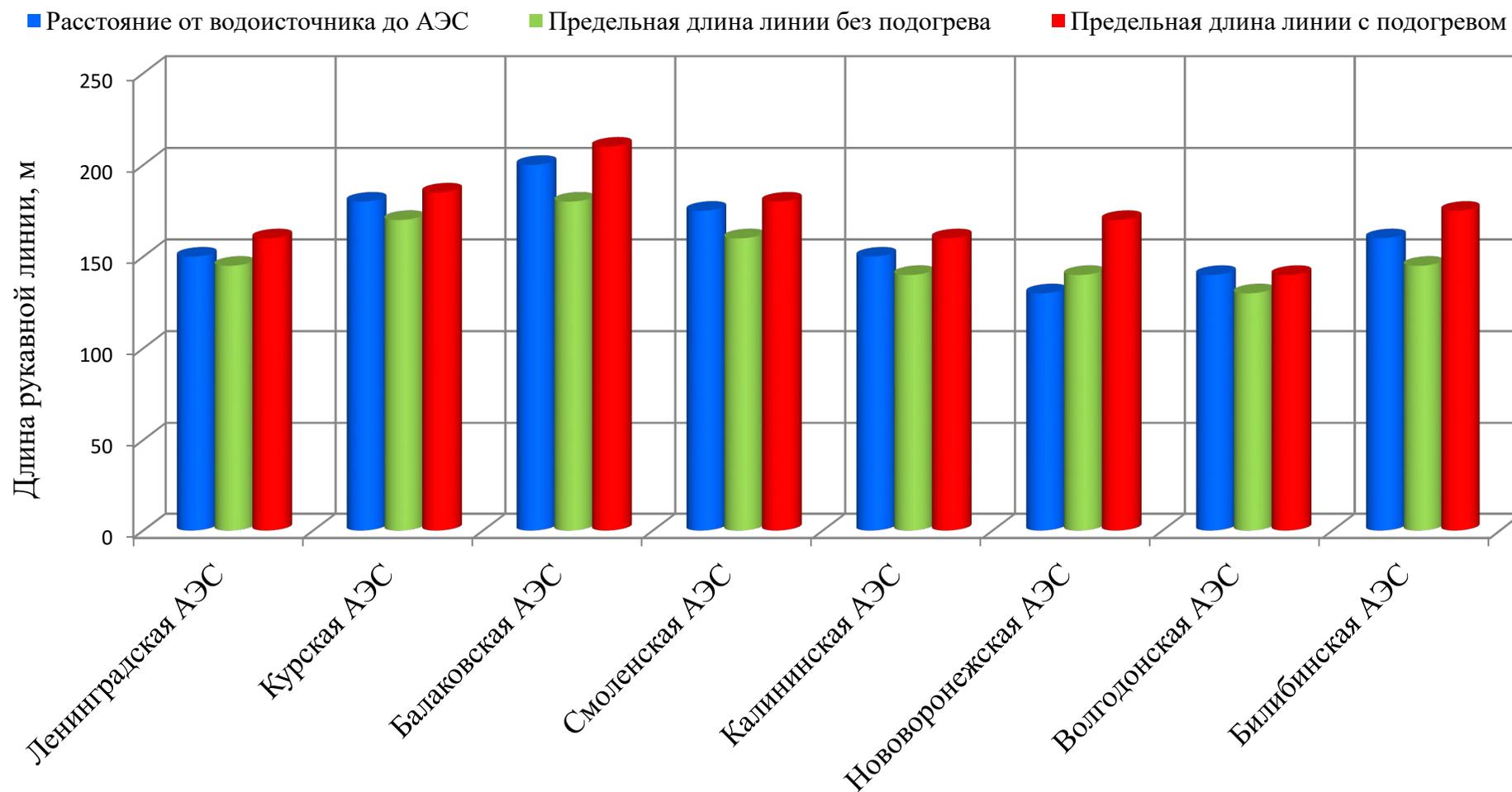


Рисунок 3.15 – Результаты оценки возможности подачи компрессионной пены по насосно-рукавным системам на объектах энергетики в условиях низких температур

Проведенное исследование позволило определить комплекс технических требований и решений для повышения эффективности работы пожарных подразделений. Для увеличения расстояния подачи компрессионной пены по насосно-рукавным системам в условиях низких температур предлагается:

- оснастить пожарный автомобиль мобильной пеногенерирующей установкой (компрессорного или баллонного типа);
- установка отопителя для всех отсеков пожарного автомобиля;
- организовать подогрев всех компонентов компрессионной пены во избежание их охлаждения ниже 0 °С на всем протяжении рукавной линии.
- установить ограничители открывания пожарных отсеков для минимизации теплопотерь.
- использовать качественные материалы для изготовления задвижек с пневмоприводом для снижения количества отказов при эксплуатации в условиях низких температур;
- обеспечить подачу пены с кратностью, не превышающей 12, для достижения максимального расстояния рукавной линии.
- Подогревать исходную температуру смеси до 40 °С для сохранения эффективности пены;
- предусмотреть отдельный пенобак для пеногенерирующей установки, так как она требует применения 1% или 3% пенообразователя, в отличие от стандартных установок.

3.4 Разработка рекомендаций по применению технологии подачи компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур

Основой для разработки данных рекомендаций послужили проведенные натурные эксперименты по применению компрессионной пены в условиях низких температур.

3.4.1 Особенности возникновения пожаров на объектах атомной энергетики

Объекты энергетики характеризуются размещением агрегатов и установок в зданиях I и II степеней огнестойкости. Основное здание интегрирует в себе машинный зал, служебно-бытовые помещения, главный щит управления и распределительные устройства генераторного напряжения. Распределительные устройства высокого напряжения (закрытого или открытого типа) располагаются в обособленных сооружениях.

Современные машинные залы, включая объекты атомной энергетики, отличаются значительными габаритами: протяженность превышает 200 м, высота достигает 30–40 м, а шаг несущих колонн составляет 30–50 м. Данные помещения характеризуются высокой пожарной нагрузкой, обусловленной наличием турбинного масла в системах смазки, горючей электроизоляции обмоток генераторов и иного оборудования. Турбоагрегаты размещаются на технологических площадках на отметке 8–10 м и выше. Маслосистемы включают баки емкостью 10–15 т, расположенные на нулевой отметке, и маслопроводы с рабочим давлением до 1,4 МПа. Разгерметизация данных систем инициирует интенсивное распространение пламени по площадкам и вниз — к маслосборникам, а разрушение напорного трубопровода способно привести к

образованию факела горящего масла. Это создает риск термической деформации и обрушения металлоконструкций.

Применение водородного охлаждения генераторов создает потенциальную опасность взрывов в объеме машзала. Последствием может быть повреждение маслопроводов с последующим растеканием и воспламенением масла на значительных площадях (кабельные тоннели, межэтажные перекрытия, смежные агрегаты), что способно вызвать взрыв сосудов высокого давления в условиях пожара.

Кабельное хозяйство энергообъектов (полуэтажи, тоннели, каналы, галереи) сегментируется противопожарными перегородками на отсеки длиной не более 40 м внутри зданий и 100–150 м — снаружи. Конфигурация тоннелей (горизонтальные, наклонные) обычно имеет сечение от 2×2 м. Каждый отсек должен быть оснащен минимум двумя лазами (диаметр 0,7–0,9 м), системами вентиляции и водоотвода. Пожарная нагрузка (масса горючей изоляции на единицу площади) в кабельных сооружениях оценивается в 30–60 кг/м².

Возникновение пожаров в этих помещениях сопровождается высокими тепловыми потоками, разлетом искр от расплавившегося при КЗ металла, интенсивным газовыделением и быстрым распространением пламени. Линейная скорость распространения огня составляет:

В обесточенных горизонтальных тоннелях: 0,15–0,3 м/мин.

В кабельных полуэтажах под напряжением: 0,2–0,8 м/мин.

Температурный режим характеризуется скоростным ростом со средним градиентом 35–50 °С/мин.

В туннелях с маслonaполненными кабелями пожарную опасность представляет трансформаторное масло. В случае аварии горящее масло быстро распространяется по уклонам, что существенно увеличивает площадь пожара. Пожары в кабельных помещениях могут распространяться на здания и распределительные устройства электростанций, создавая угрозу возникновения пожаров на других участках энергосетей.

Также важно учитывать возможность пожаров на открытых распределительных устройствах, таких как трансформаторы, масляные выключатели и кабельное хозяйство.

Например, при коротком замыкании и образовании электрической дуги трансформаторное масло может деструктивно распадаться на горючие газы, что приводит к возможным взрывам. Эти взрывы могут повлечь разрушение трансформаторов и масляных выключателей, а также распространение пожара от горящего масла.

Пожары, начавшиеся в помещениях с установленными трансформаторами, могут распространяться на помещения с распределительными щитами, кабельными каналами и туннелями, создавая угрозу для соседних установок и трансформаторов. Объем возможных очагов пожаров можно оценить по тому факту, что в каждом трансформаторе или реакторе содержится до 100 тонн масла.

На объектах атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах, помимо вышеперечисленных факторов, при авариях может возникнуть горение жидкометаллического теплоносителя (натрий, калий). При взаимодействии с химическими веществами и тушащими средствами такое горение может привести к увеличению температуры, выбросу токсичных газов и возможным взрывам, что ведет к возникновению опасных уровней радиации.

3.4.2 Общие требования по применению компрессионной пены

Тушение пожаров на энергообъектах связано с опасностью поражения электрическим током в результате прикосновения или приближения к незащищенным токоведущим частям электроустановок, а также с поражением личного состава при прохождении тока через струи пены. В связи с этим работа личного состава имеет некоторые особенности, основанные на соблюдении мер безопасности.

Подавать компрессионную пену на тушение электроустановок необходимо только при снятом напряжении. Как исключение допускается подача компактными или распыленными струями лишь на открытые для обзора ствольщика токонесущие части установок, находящихся под напряжением до 10 кВ включительно. При этом ствольщик должен работать с заземленным стволом, в диэлектрической обуви и перчатках.

Тушение пожара в помещениях с электроустановками, находящимися под напряжением свыше 10 кВ, всеми видами пен с помощью ручных средств запрещается [130-135].

В качестве источников водоснабжения для подачи компрессионной пены могут применяться открытые водоемы, пожарные резервуары или водопроводы различного назначения.

Давление в системе подачи компрессионной пены должно соответствовать диапазону давления, рекомендованному заводом-производителем на конкретную систему подачи компрессионной пены.

В мобильной технике, укомплектованной системой подачи компрессионной пеной, должен иметься запас огнетушащих веществ для обеспечения работы установки подачи компрессионной пены.

Пенообразователь, используемый для генерирования пены компрессионным способом, должен быть одобрен к применению производителем оборудования.

Не допускается смешивание различных сортов пенообразователей одного и того же типа, за исключением случаев, когда производитель представил соответствующие документы, подтверждающие их совместимость.

Для обеспечения работоспособности система подачи компрессионной пены должна быть обеспечена компрессором для подачи воздуха.

Применение компрессионной пены является целесообразным в большинстве случаев пожаров и возгораний электрооборудования под напряжением до 10 кВ с различной горючей нагрузкой оборудования.

При тушении пожаров горючих жидкостей рекомендуется применение компрессионной пены с «сухой» консистенцией, это обусловлено низким содержанием жидкой фазы в пене и повышенной эффективностью тушения таких веществ.

Выбор напорных рукавов, используемых для подачи компрессионной пены, должен осуществляться в зависимости от требуемой длины рукавной линии и высоты ее подъема в зависимости от следующих условий [136-143]:

– при высотах не более 20 м и рукавных линиях до 100 м для подачи компрессионной пены могут быть использованы пожарные напорные рукава малого сечения (DN 40 мм). Однако при использовании таких рукавов длина рукавной линии для подачи «мокрой» пены с кратностью менее 8 может быть не более 100 м;

– рукава сечением DN 50 мм подойдут для случаев подачи компрессионной пены на высоту до 50 м при длине рукавной линии до 200 м;

– рукава с сечением DN 65 мм необходимо использовать при подаче компрессионной пены на высоты более 50 м и (или) на расстояния более 200 м. При этом следует учитывать, что возможность подачи «мокрой» пены будет ограничена высотой 50÷60 м, а длина рукавной линии во всех случаях не может быть более 500 м.

При оценке необходимых запасов ОВ для тушения обычных возгораний необходимо использовать следующие показатели удельного расхода ОВ на единицу площади горения:

– для «сухой» пены с кратностью более 10–1,5 л/м²;

– для «мокрой» пены с кратностью менее 10–2,5 л/м².

Рекомендуется в процессе тушения с применением компрессионной пены применять тактику защиты близлежащих строений при помощи «сухой» пены путем нанесения слоя пены на защищаемую поверхность. Следует учитывать, что в зависимости от близости очага горения и характера защищаемой поверхности с течением времени может потребоваться повторное нанесение защитного слоя пены.

Для тушения пожаров с проливом горючих жидкостей рекомендовано применение «сухой» компрессионной пены.

3.4.3 Общие требования применения компрессионной пены в условиях низких температур

При тушении пожаров в условиях низких температур необходимо осуществлять следующие действия (Приложение Е):

- использовать системы подогрева воды для питания цистерны автомобиля, оснащенного системой подачи компрессионной пены;

- для дозаправки цистерны подачи компрессионной пены использовать горячую воду из системы внутреннего водоснабжения объекта энергетики;

- при невозможности подачи горячей воды в систему подачи компрессионной пены ограничить применение «сухой» пены при тушении пожаров;

- при тушении пожаров с применением перекрывных стволов не перекрывать подачу компрессионной пены;

- обеспечить теплоизоляцию отсека компрессора пожарного автомобиля;

- не рекомендуется подача компрессионной пены с помощью установки подачи баллонного типа;

- при открывании отсека, в котором размещена установка подачи компрессионной пены, необходимо предусмотреть не полное открывание, а только частичное;

- при подаче компрессионной пены следует учитывать предельные расстояния подачи компрессионной пены в зависимости от температуры окружающей среды, скорости ветра, кратности компрессионной пены;

- при оценке параметров подачи компрессионной пены в зависимости от температуры окружающей среды, скорости ветра, и кратности, для определения предельной длины рукавной линии при тушении пожара необходимо

использовать таблицу 3.1;

– избегать заломов рукавов при прокладке рукавных линий через препятствия, использовать «рукавные седла», предотвращающие заломы.

Таблица 3.1 – Расчетный метод оценки охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам

Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Кратность компрессионной пены									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
		Предельная длина рукавной линии									
0	0,5	760	720	680	640	620	560	480	460	400	400
	2	640	480	300	280	140	120	120	80	40	40
	5	580	260	260	140	80	60	80	80	40	40
-10	0,5	280	160	140	100	60	40	80	60	20	20
	2	240	140	140	80	60	40	40	20	20	20
	5	200	140	100	80	40	40	40	20	20	20
-15	0,5	200	120	100	80	40	40	40	20	20	20
	2	180	120	80	80	40	40	40	20	20	20
	5	180	100	80	60	40	40	20	20	20	20
-20	0,5	180	100	80	60	40	20	20	20	20	20
	2	160	100	80	60	40	20	20	20	20	20
	5	140	100	60	40	20	20	20	20	20	20
-25	0,5	140	100	60	40	20	20	20	–	20	20
	2	120	80	60	40	20	20	20	–	20	20
	5	120	80	60	40	20	20	20	–	20	–
-30	0,5	120	80	40	40	20	20	20	–	20	–
	2	120	80	40	40	20	20	20	–	–	–
	5	100	60	40	40	20	20	20	–	–	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный статистический анализ свидетельствует о том, что на объектах энергетического комплекса в зимний период наблюдается значительное осложнение оперативной обстановки, связанной с возникновением и развитием пожаров. Для обеспечения эффективного тушения пожаров в данных условиях представляется необходимым применение перспективных средств тушения, в частности, компрессионной пены.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны методика проведения и измерительный комплекс, которые позволили в широком диапазоне температур (от минус 10 до минус 30 °С) исследовать режимы работы насосно-рукавных систем ПА при подаче компрессионной пены в рукавных линиях, что дает возможность произвести прогноз работоспособности НРС ПА, работающих в условиях низких температур.

Предложена и обоснована математическая модель процесса охлаждения компрессионной пены при передвижении через насосно-рукавные системы в условиях низких температур. Эта модель позволяет оценить охлаждение пены в зависимости от режима работы установки для генерации пены. Результаты экспериментов были сопоставлены с теоретическими данными, достигнута погрешность измерений не более **17 %**.

Разработан программный комплекс и сформулированы рекомендации для предварительного планирования действий подразделений пожарной охраны по тушению объектов энергетики и оценке их возможностей с учетом особенностей охлаждения компрессионной пены при низких температурах.

Обоснованы технические решения для поддержания работоспособности пожарного автомобиля при тушении пожаров на объектах энергетики, учитывающие специфику охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетика России [Электронный ресурс]: обзор отрасли. – Режим доступа: <https://energoseti.ru/articles/energetika-rossii> (дата обращения 08.12.2024).
2. Электроэнергетика России [Электронный ресурс]: обзор отрасли // Фабрикаторс: сайт. Режим доступа: <https://fabricators.ru/article/elektroenergeti-ka-rossii> (дата обращения 08.12.2024).
3. Клячин, В. М. Теоретические подходы к классификации объектов атомной энергетики как объектов правоохранительной деятельности в условиях катастроф [Текст] / В. М. Клячин // Евразийский юридический журнал. – 2015. – № 1(80). – С. 138–142.
4. Дягилев, В. В. Актуальность ПАТЭС в атомной энергетике России [Текст] / В. В. Дягилев, С. М. Мамедов, И. В. Вотякова // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий : Материалы конференции. Научная сессия НИЯУ МИФИ. – Северск: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2020. – С. 127.
5. Желваков, Е. М. Обеспечение технической готовности и работоспособности пожарных автоцистерн объектовых пожарных частей в условиях низких температур: специальность 05.26.03 "Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Желваков Евгений Михайлович. – Москва, 2001. – 318 с.
6. Формирование парка специальных машин для проведения операций повышенной сложности на критически важных объектах энергетики / М. В. Алешков, Н. П. Копылов, М. Д. Безбородько, С. Г. Цариченко // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 3(43). – С. 23.
7. Двоенко, О. В. Опыт исследования работоспособности пожарно-спасательной техники в условиях низких температур [Текст] / О. В. Двоенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 3. – С. 28–37.

8. Алешков, М. В. От концепции создания до разработки основного пожарного автомобиля Северного исполнения [Текст] / М. В. Алешков // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 131-135.

9. Алешков, М. В. Пожарная техника для ликвидации пожаров и аварий на объектах энергетики [Текст] / М. В. Алешков, О. В. Двоенко, И. А. Ольховский // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 2(76). – С. 69–72.

10. Пивоваров, В. В. Задачи обеспечения оперативной готовности парка пожарных автомобилей: пути и методы их решения [Текст] / В. В. Пивоваров, Ю. С. Кузнецов, К. Ю. Яковенко, Ю. Ф. Яковенко // Пожарная безопасность. – 2007. – № 2. – С. 23–33.

11. Савин, М. А. Повышение эффективности эксплуатации двигателей основных пожарных автомобилей в условиях отрицательных температур [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Савин Михаил Александрович. – М., 2001. – 225 с.

12. Желваков, Е. М. Обеспечение технической готовности и работоспособности пожарных автоцистерн объектовых частей в условиях низких температур [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Желваков Евгений Михайлович. – М., 2001. – 318 с.

13. Егоров, Г. И. Повышение работоспособности систем насосных установок пожарных автомобилей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Егоров Григорий Иванович. – М., 1993. – 170 с.

14. Синельникова, Е. А. Необходимость создания мобильной пожарной техники с применением установок для получения и подачи газонаполненной пены [Текст] / Е. А. Синельникова, А. Ю. Ушаков, А. А. Кротова [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности : Материалы XXVII международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России: в 3 ч. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2015. – С. 162–174.

15. Навроцкий, О. Д. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения [Текст] / О. Д. Навроцкий [и

др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 1(15). – С. 22–31.

16. Алешков, М. В. Применение сплошных водных струй при тушении электроустановок под напряжением на объектах атомной энергетики [Текст] / М. В. Алешков, Р. А. Емельянов, А. А. Колбасин, В. Д. Федяев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014. – № 4. – С. 17–23.

17. Федяев, В. Д. Гидродинамика компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики [Текст] / В. Д. Федяев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 3. – С. 44–48.

18. Некрасов, Д. П. К вопросу применения компрессионной пены при тушении пожаров / Д. П. Некрасов, А. Ю. Шварев // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2018. – № 1(9). – С. 328–330.

19. Грачулин, А. В. Установки пожаротушения компрессионной пеной [Текст] / А. В. Грачулин, К. Е. Шинкоренко // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: Сборник материалов V международной научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 241–248.

20. Камлюк, А. Н. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом [Текст] / А. Н. Камлюк, О. Д. Навроцкий, А. В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1. – № 1 – С. 44–53.

21. Шинкоренко, К. Е. Методика экспериментального определения режимов течения компрессионной пены [Текст] / К. Е. Шинкоренко, А. В. Грачулин, В. Н. Рябцев // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – № 2. – С. 188–201. DOI:10.33408/2519-237X.2023.7-2.188

22. Шавалеев, М. Р. Мобильная установка получения компрессионной пены для тушения пожаров [Текст] / М. Р. Шавалеев, М. П. Дальков, Н. М. Барбин, А. В. Пешков // Безопасность жизнедеятельности. – 2019. – № 2(218). – С. 49–52.

23. Навроцкий, О. Д. Научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам установок генерирования компрессионной пены и методика их испытаний [Текст] / О. Д. Навроцкий, А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин, А. О. Лихоманов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – № 1. – С. 81–92. DOI:10.33408/2519-237X.2021.5-1.81.

24. Качалов А.А. Гидравлические сопротивления при движении воздушно-механической пены по трубопроводам, и пенные струи [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Качалов Александр Алексеевич – М., 1970. – 160 с.

25. Родионова, И. А. Экономическая география [Текст] : учеб. пособие / И. А. Родионова, Т. М. Бунакова. – М.: Моск. лицей, 1998. – 663 с.

26. Энергопотребление в России в 2023 году [Электронный ресурс] // ТАСС: сайт. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/19814169> (дата обращения 31.03.2024).

27. Трухний, А. Д. Основы современной энергетики [Текст] : В 2 ч. Ч. 1 : Современная теплоэнергетика // А. Д. Трухний, А. А. Макаров, В. В. Клименко; под общ. ред. Е. В. Аметистова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2002. – 367 с.

28. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году [Текст] : Статистический сборник / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2023. – 80 с.

29. Шевелев, Н. В. Тушение пожаров и проведение аварийно-спасательных работ на ТЭЦ / Н. В. Шевелев, А. В. Кузовлев // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1. – № 9. – С. 989-991

30. Основные характеристики российской электроэнергетики [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации: сайт. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20200531121059/https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения 08.12.2024).

31. Морозова, К. А. Износ оборудования, как причина крупных аварий в энергетике, на примере ПС №510 "Чагино" / К. А. Морозова // Энергия-2019: Четырнадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. Материалы конференции. В 6 т., Иваново, 02–04

апреля 2019 года. Том 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 49.

32. Белов, В. В. Крупные аварии на ТЭС и их влияние на компоновочные решения главных корпусов [Текст] / В. В. Белов, Б. К. Пергаменщик // Вестник МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 61–69.

33. Пузач, С. В. К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости [Текст] / С. В. Пузач, Е. С. Абакумов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 2. – С. 31–34.

34. Исследования и прогноз чрезвычайных ситуаций на объектах ГРЭС. Саенко Е.П., Младова Т.А.В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч. Комсомольск-на-Амуре, 2020. – С. 67-69.

35. Дорофеев, В. В. Тактические действия подразделений при тушении пожаров на ТЭЦ-3 Г. Барнаула Алтайского края / В. В. Дорофеев // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности, Иваново, 29–30 ноября 2018 года. Том Часть 1. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2018. – С. 352-35.

36. О мерах по повышению взрывопожаробезопасности энергетических объектов [Электронный ресурс]: приказ ОАО РАО «ЕЭС России» от 01.07.1998 № 120 // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 02.10.2024).

37. Тактика тушения пожаров на объектах энергетики [электронный ресурс] - Режим доступа: <https://nachkar.ru/taktika/obgect-energetiki.htm> (дата обращения 07.11.2018).

38. Иванников, В. П. Справочник руководителя тушения пожара [Текст] / В. П. Иванников, П. П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.

39. Что известно об аварии на ТЭЦ в Улан-Удэ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestviya/13278471> (дата обращения 16.07.2022).

40. Шевелев, Н. В. Тушение пожаров и проведение аварийно-спасательных работ на ТЭЦ / Н. В. Шевелев, А. В. Кузовлев // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1. – № 9. – С. 989-991.

41. Карапузиков, А. А. О проблеме развития и тушения пожаров в трансформаторах / А. А. Карапузиков, Н. П. Мураев, М. В. Дьяков // Инициативы молодых - науке и производству: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 386-389.

42. Климатологический справочник по СССР [Текст] / Сост. Институтом климатологии под руководством А. А. Каминского, Е. С. Рубинштейна; Гидрометеорол. ком. СССР. Глав. геофиз. обсерватория. – Л.: [б. и.], 1931–1967.

43. Гудкович, З. М. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей [Текст] / З. М. Гудкович, А. А. Кириллов, Е. Г. Ковалев [и др.]; Под ред. Н. А. Волкова и Ю. В. Николаева ; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-т. – Л.: Гидрометеоиздат. – 347 с.

44. Броунов, П. И. Избранные сочинения [Текст]: Т. 1: Синоптическая метеорология / ред.-сост. Р. Ф. Усманов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957. – 303 с.

45. Алисов, Б. П. Климатические области и районы СССР [Текст] / Б. П. Алисов; Моск. ордена Ленина гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч.-исслед. ин-т географии. – М.: Географгиз, 1947. – 212 с.

46. Алисов, Б. П. Климатические области зарубежных стран [Текст] / Б. П. Алисов; Моск. ордена Ленина гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч.-исслед. ин-т географии. – М.: Географгиз, 1950. – 352 с.

47. Об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2035 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2017 № 1209-р // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2023. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 16.07.2024).

48. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2023. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 16.07.2024).

49. Федоров, Д. В. Современные тенденции развития энергетики в Российской Федерации [Текст] / Д. В. Федоров // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки СКАГС. – 2013. – № 1. – С. 106–112.

50. Горбанев, В. А. Район Южной Сибири в новой сетке географического районирования России [Текст] / В. А. Горбанев, Б. И. Кочуров // Теоретические и прикладные проблемы географической науки: демографический, социальный, правовой, экономический и экологический аспекты : Материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет, 2019. – С. 53–57.

51. Ищенко, А. Д. Проблематика сохранения работоспособности объекта энергетики в условиях пожара [Текст] / А. Д. Ищенко // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2016. – № 1(28). – С. 72–77.

52. Матвеев, А. В. Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС [Текст] / А. В. Матвеев, М. В. Иванов, А. Б. Шевченко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 6(113). – С. 91-95.

53. Алешков, М. В. Особенности развития и тушения пожаров, возникающих по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования [Текст] / М. В. Алешков, А. А. Колбасин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2010. – № 3. – С. 54–57.

54. Пузач, С. В. К расчету безопасной эвакуации людей из машинных залов гидроэлектростанций [Текст] / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, И. В. Деревяшкин, В. П. Спиридонов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 6(98). – С. 66–73.

55. Васильева, К. К. Свойства воды [Текст] / К. К. Васильева, М. А. Братковская // Научный лидер. – 2022. – № 2(47). – С. 68–70.

56. Шакиров, В. А. Оценка экономической целесообразности подключения удаленных потребителей восточной Арктики к энергосистеме [Текст] / В. А. Шакиров, И. Ю. Иванова, Р. А. Иванов // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 19–33. – DOI:10.25283/2223-4594-2022-1-19-33

57. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году [Текст] : государственный доклад. – М.: МЧС России; ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023. – 264 с.

58. Кострубицкий, А. А. Моделирование развития и тушения пожара в помещении пеной и диспергированной водой [Текст] / А. А. Кострубицкий // Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности : Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. В 4-х ч. – Белгород: Агентство перспективных научных исследований, 2017. – С. 101–106.

59. Применение воздушно-механической пены для локализации и ликвидации пламенного горения проливов сжиженного природного газа / М. В. Алешков, В. П. Молчанов, С. А. Макаров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 5. – С. 67–82.

60. Шароварников, А. Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства и применение [Текст] / А. Ф. Шароварников, С. А. Шароварников. – М.: Пожнаука, 2005. – 23 с.

61. Гайфуллин, В. В. Свойства воздушно-механической пены, влияющие на огнетушащую эффективность пены [Текст] / В. В. Гайфуллин // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли: Материалы IV Международной научно-практической конференции / Министерство науки и образования РФ, Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. – С. 76.

62. Казаков, М. В. Средства и способы тушения пламени горючих жидкостей [Текст] / М. В. Казаков [и др.]. – М.: Стройиздат, 1977. – 42 с.

63. Мешман, Л. М. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения [Текст] / Л. М. Мешман, С. Г. Цариченко, В. А. Былинкин. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2002. – 34 с.

64. Алешков, М. В. Вопросы обеспечения работоспособности напорных рукавных линий при тушении пожаров в зимних условиях [Текст] / М. В. Алешков, М. Д. Безбородько // Актуальные проблемы тактики тушения пожаров, совершенствование пожарной техники. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1992. – С. 48–53.

65. Говор, Э. Г. О линейной зависимости кратности и устойчивости пены в диапазоне низкократных пен [Текст] / Э. Г. Говор, А. О. Лихоманов, А. Н. Камлюк // Проблемы техносферной безопасности : Материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2021. – № 10. – С. 13–16.

66. Безродный, И. Ф. Тушение нефти и нефтепродуктов [Текст] / И. Ф. Безродный. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1996. – 64 с.

67. Бурдин, А. М. Установки пожаротушения с использованием компрессионной пены. Технологические особенности и преимущества [Текст] / А. М. Бурдин // Актуальные проблемы пожарной безопасности : Материалы XXVII

международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России: в 3 ч. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2015 – Ч. 2. – С. 274–286.

68. Карпенчук, И. В. Использование пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для целей пожаротушения [Текст] / И. В. Карпенчук // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : Материалы V международной научно-практической конференции курсантов, студентов и слушателей. – Мн.: Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, 2011. – Ч. 1. – С. 119–124.

69. Камлюк, А. Н. Численное моделирование движения огнетушащего вещества по проточному тракту водопенного насадка [Текст] / А. Н. Камлюк и др. // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1(23). – С. 60–67.

70. *CAFS - Straight answers for the beginner or the experienced user // CAFS: сайт. URL: http://compressedairfoamsystem.com/compressed_air_foam_system.s.htm (дата обращения: 11.04.2024). McLaughlin, W. L. properties of compressed foam. Executive leadership / McLaughlin, W. L. // San Juan Country Fire District No. 3. – Friday Harbor, Washington, 2001.*

71. *Brinkley, J. Capabilities and limitations of compressed air foam systems (CAFS) for structural firefighting / Brinkley J., Depew R. // The Fire Protection Research Foundation. 2012. – 58 p.*

72. *Kim, A. K. Evaluation of the fire suppression effectiveness of manually applied compressed-air-foam (CAF) system / A. K. Kim, G. P. Crampton // Fire technology, 48(3):549–564, 2012. DOI:10.1007/s10694-009-0119-3*

73. *Rie, D. H., Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios / D. H. Rie, J. W. Lee, S. Kim // Applied Sciences. A.K. Kim and G.P. Crampton. Evaluation of the fire suppression effectiveness of manually applied compressed-air-foam (CAF) system. Fire technology, 48(3):549–564, 2016.*

74. Cheng, J. *Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel* / J. Cheng, M. Xu // *Proced. Eng.* 2014, 71, 44–56. DOI:10.1016/j.proeng.2014.04.007

75. Lee, J. W. *A study on B class fire extinguishing performance of air ratio in the compressed air foam system* / J. W. Lee, W. S. Lim, D. H. Rie // *Fire Science and Engineering.* 2013. 27(6). DOI:10.7731/KIFSE.2013.27.6.008

76. Lee, J.-W. *A Study on Fire Extinguishing Performance Evaluation of Compressed Air Foam System* / J.-W. Lee, W.-S. Lim, S.-S. Kim, D.-H. Rie // *J. Korean Inst. Fire Sci. Eng.* 2. 2012, 26(5):73-78 DOI:10.7731/KIFSE.2012.26.5.073

77. Cheng, J. *Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel* / J. Cheng, M. Xu // *Eng.* 2014, 71, 44-56. DOI:10.1016/j.proeng.2014.04.007

78. Parikh D. Experimental study of pressure drop and bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system.

79. Xuecheng Fu, Zhiming Bao, Tao Chen, Jianjun Xia, Xianzhong Zhang, Jin Zhang, Yingnian Hu Application of compressed air foam system in extinguishing oil tank fire and middle layer effect // *Procedia Engineering.* 2012. – № 45. – Pp. 669-673. ГОСТ Р 58792-2019. Техника пожарная. Мобильные системы генерирования компрессионной пены. Общие технические требования. Методы испытаний [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 02.10.2024).

80. Шварев, А. Ю. Компрессионная пена - помощник пожарной охраны [Текст] / А. Ю. Шварев, В. А. Смирнов // *Аллея науки.* – 2019. – Т. 1. – № 1(28). – С. 816–824.

81. Карапузиков, А. А. К вопросу об эффективности применения в тушении пожаров компрессионной пены технологии NATISK [Текст] / А. А. Карапузиков, М. Р. Шавалеев, А. А. Палло [и др.] // *Техносферная безопасность.* – 2019. – № 3(24). – С. 30–35.

82. Кочуров, В. И. Системы получения компрессионной пены у зарубежных производителей [Текст] / В. И. Кочуров, А. В. Наумов // Надежность и долговечность машин и механизмов: Сборник материалов X всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 440-443.

83. Гумиров, А. С. Исследование массового расхода компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам [Текст] / А. С. Гумиров, А. О. Стругов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Материалы XXXII международной научно-практической конференции. – Балашиха: ВНИИПО МЧС России, 2020. – С. 318–323.

84. Молчанов, В. П. Исследование параметров массового расхода при подаче по насосно-рукавным системам компрессионной пены [Текст] / В. П. Молчанов, В. Д. Федяев, А. С. Гумиров, А. О. Стругов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 4. – С. 5–10.

85. Гумиров, А. С. Измерительный комплекс для определения интенсивности охлаждения огнетушащих веществ [Текст] / А. С. Гумиров, А. А. Шульпинов // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2020. – № 9. – С. 106–110.

86. Алешков, М. В. Исследование параметров интенсивности охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур [Текст] / М. В. Алешков, Т. Г. Меркушкина, В. Д. Федяев, А. С. Гумиров // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 2(92). – С. 8–19. – DOI:10.25257/TTS.2021.2.92.8-19

87. Гумиров, А. С. Экспериментальные исследования охлаждения компрессионной пены при её подаче при разных температурных режимах окружающей среды [Текст] / А. С. Гумиров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 4. – С. 40-44.

88. Кузнецов, Е. А. Оценка точности расчета температуры и потерь активной мощности приближенного решения уравнения теплового баланса

воздушных линий электропередач [Текст] / Е. А. Кузнецов, А. Я. Бигун, И. В. Великий [и др.] // Актуальные проблемы энергетики АПК : VI международная научно-практическая конференция. – Саратов: Центр социальных агроинноваций СГАУ, 2015. – С. 128–130.

89. Потеряев, Ю. К. Сравнение эффективности компрессионной пены и пены низкой кратности AFFF / Ю. К. Потеряев, А. В. Мироньчев, А. М. Ощепков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 3. – С. 32-38.

90. Матвиенко, О. В. Исследование теплообмена и формирования турбулентности во внутреннем закрученном потоке жидкости при низких числах Рейнольдса [Текст] / О. В. Матвиенко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 908–918.

91. Алешков, М. В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений [Текст] / М. В. Алешков // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 5. – С. 59–63.

92. Камлюк, А. Н. Особенности применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров [Текст] / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2. – № 2. – С. 168–175.

93. Гордиенко, Д. М. Проблемы использования компрессионной пены для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности с применением беспилотных авиационных систем [Текст] / Д. М. Гордиенко, Е. В. Павлов, Ю. Н. Осипов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – № 3(96). – С. 42–46.

94. *Ebrahimi-Mamaghani, A. Dynamics of two-phase flow in vertical pipes / A. Ebrahimi-Mamaghani [et al.] // Journal of Fluids and Structures. – 2019. – T. 87. – Pp. 150–173.*

95. Горев, А. Р. Экономический эффект использования компрессионной пены [Текст] / А. Р. Горев, В. А. Смирнов // Надежность и долговечность машин и механизмов: Сборник материалов X всероссийской научно-практической

конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 405–409.

96. Кокшаров, А. В. Изучение параметров работы системы компрессионной пены «Натиск» на АЦ-СПК-5,0-60-Natisk (43253)07Г-ТВ [Текст] / А. В. Кокшаров, А. Н. Иванов, Е. В. Гайнуллина // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : Материалы всероссийской научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2022. – С. 101–102.

97. Влияние величины дисперсии распределения ошибки измерения на доверительный интервал измеренной величины: компьютерный анализ / В. Н. Нестеров, Б. В. Нестеров, А. П. Поздняков, Д. А. Ерохин // Альманах современной науки и образования. – 2012. – № 12-2(67). – С. 107-111.

98. Преснов, А. И. Системы пенного тушения пожарных автомобилей. Новые технологии, проблемные вопросы, перспективы [Текст] / А. И. Преснов, А. В. Данилевич // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2015. – № 3. – С. 47–54.

99. РД 153-34.0-03.301-00 (ВППБ 01-02-95*). Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий (утв. РАО ЕЭС России 09.03.2000) (вместе с «Положением об ответственности работников энергетических предприятий за обеспечение пожарной безопасности», «Программой подготовки персонала по пожарной безопасности в электроэнергетической отрасли», «Положением о пожарно-технических комиссиях на предприятиях и в организациях электроэнергетической отрасли») [Электронный ресурс]: руководящий документ // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2023. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 07.03.2024).

100. О функциональной подсистеме предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах) топливно-энергетического

комплекса и в организациях (на объектах), находящихся в ведении Минэнерго России» (вместе с «Положением о функциональной подсистеме предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в организациях (на объектах) топливно-энергетического комплекса и в организациях (на объектах), находящихся в ведении Минэнерго России», «Положением о Комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности Минэнерго России» [Электронный ресурс]: приказ Минэнерго РФ от 09.06.2011 № 222 (зарег. в Минюсте РФ 22.07.2011 № 21464) // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2023. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 07.03.2024).

101. Тушение пожаров в условиях экстремально низких температур Арктического шельфа [Текст] / Л. А. Закирова, И. К. Бакиров // Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе : Материалы международной научно-практической конференции. Том I. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 260–263.

102. Кирин, Е. О. Рукавные системы в условиях низких температур [Текст] / Е. О. Кирин, О. В. Кабанов, А. В. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : Материалы IX международной научно-практической конференции. – Саратов: Амирит, 2022. – С. 361–365.

103. Кокшаров, А. В. Повышение устойчивости компрессионной пены с помощью модифицированной целлюлозы [Текст] / А. В. Кокшаров, С. И. Осипенко, М. Л. Кондратьева // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : Материалы всероссийской научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2022. – С. 103–104.

104. Короткевич, А. О. Анализ и совершенствование системы обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики [Текст] / А. О. Короткевич // Енисейская Арктика : Сборник материалов всероссийской научно-практической

конференции. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. – С. 120–125.

105. Алешков, М. В. Пожарная автоцистерна с системой обеспечения работоспособности насосно-рукавных систем в условиях низких температур АЦ-СОР [Текст] / М. В. Алешков, И. А. Ольховский, О. В. Двоенко [и др.] // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : Материалы VII международной научно-практической конференции. В 2-х ч. Том Часть 2. – М.: Академия ГПСМЧС России, 2020. – С. 101–104.

106. Таранцев, А. А. Проблема подавления пожара на удаленных автономных объектах в условиях экстремально низких температур [Текст] / А. А. Таранцев, А. Д. Ищенко, А. Л. Холостов [и др.]. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 2. – С. 30–40. – DOI:10.25257/FE.2019.2.30-40

107. Скорупич, И.С. Экспериментальные исследования подачи струи компрессионной пены [Текст] / И. С. Скорупич, А. В. Грачулин, К. Е. Шинкоренко // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – № 2. – С. 201–210.

108. Таранцев, А. А. Обоснование инновационного способа тушения пожара на объектах инфраструктуры в условиях низких температур [Текст] / А. А. Таранцев, А. Д. Ищенко, А. А. Таранцев // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 1-1(51). – С. 84–89. – DOI:10.37220/МІТ..2021.51.1.012

109. Федяев, В. Д. Современные технологии тушения пожаров на объектах энергетики [Текст] / В. Д. Федяев, А. О. Стругов // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2022. – № 11. – С. 100–105.

110. Белорожев, О. Н. Эффективность применения компрессионных пен при тушении пожаров [Текст] / О. Н. Белорожев, И. В. Багажков // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 1. – № 1(7). – С. 305–307.

111. Булатов, Н. Н. Получение компрессионной (газонаполненной) пены [Текст] / Н. Н. Булатов // Синтез науки и образования как инструмент решения

глобальных проблем современности : Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: Агентство международных исследований, 2023. – С. 119–121.

112. Чайковский, Е. В. Огонь и «Натиск» [Текст] / Е. В. Чайковский // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15. – № S2. – С. 20–22.

113. Нестеров, И. В. Актуальность разработки робототехнического комплекса с модулем пожаротушения газонаполненной пеной для обеспечения пожарной и промышленной безопасности [Текст] / И. В. Нестеров, Ю. И. Носач, И. А. Пеньков, Ю. А. Багаев // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 1(10). – С. 276-278.

114. Преснов, А. И. О применении электронных систем дозировки и впрыска пенообразователя в насосных установках пожарных автомобилей [Текст] / А. И. Преснов, А. В. Мироньчев // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2013. – С. 366–368.

115. Кодрик, А. И. Разработка математической модели установки для генерации компрессионной пены [Текст] / А. И. Кодрик, А. Н. Титенко, С. А. Виноградов, С. М. Шахов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Материалы VIII международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям. – Мн: НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Беларуси, 2019. – С. 103–115.

116. *Colletti, D. J. Compressed air foam systems and fire hose / D. J. Colletti // Fire Engineering. – 1996. – Vol. 149. – No. 7. – Pp. 50–51.*

117. Грачулин, А. В. Экспериментальные исследования движения компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале [Текст] / А. В.

Грачулин // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1(23). – С. 68–77.

118. Калашников, С. А. Инновационная технология пожаротушения с применением компрессионной пены [Текст] / С. А. Калашников // Башкирский экологический вестник. – 2012. – № 1(30). – С. 23–24.

119. Потеряев, Ю. К. Сравнение эффективности компрессионной пены и пены низкой кратности AFFF [Текст] / Ю. К. Потеряев, А. В. Мироньчев, А. М. Ощепков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 3. – С. 32–38.

120. Защита водопенных коммуникаций пожарного насоса от замерзания / В. В. Крудышев, И. С. Лазарев, А. В. Филиппов, В. В. Терентьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 11. – С. 63-69.

121. Караморин, А. Н. Проблематика тушения пожаров в условиях низких температур [Текст] / А. Н. Караморин, А. В. Жердев // Студенческий. – 2018. – № 18(38). – С. 70–72.

122. Семенов, А. Д. Работа пожарных насосов при тушении пожаров в условиях низких температур [Текст] / А. Д. Семенов, А. О. Семенов, О. Н. Белорожев // Пожарная и аварийная безопасность : сборник материалов XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности. Том Часть 1. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 492–495.

123. Алешков, М. В. Применение мобильных средств пожаротушения для защиты объектов атомной энергетики от крупных пожаров в условиях экстремально низких температур [Текст] / М. В. Алешков, М. Д. Безбородько // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014. – № 3. – С. 37–45.

124. Федяев, В. Д. Концепция применения компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики / В. Д. Федяев, А. О. Стругов, А. С. Гумиров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 4. – С. 72-78.

125. *Makhutov, N. A. Designing machinery for the Arctic: A problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions / N. A. Makhutov, V. V. Moskvichev, V. M. Fomin // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 85. – No. 1. – Pp. 79–86.*

126. Алешков, М. В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений [Текст] / М. В. Алешков // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 5. – С. 59–64.

127. Астахов, А. А. Тушение пожаров с помощью систем «NATISK» [Текст] / А. А. Астахов, В. А. Жидков, П. Е. Золотухин // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : Материалы международной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023. – С. 196–201.

128. Кирин, Е. О. Оценка тактических возможностей подразделения пожарной охраны по подаче огнетушащих веществ в условиях низких температур [Текст] / Е. О. Кирин, О. В. Кабанов, А. В. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : Материалы IX международной научно-практической конференции. – Саратов: Амирит, 2022. – С. 397–400.

129. Алешков, М. В. От концепции создания до разработки основного пожарного автомобиля северного исполнения / М. В. Алешков // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 131-135.

130. Белорожев, О. Н. Особенности применения современных средств пожаротушения при ликвидации пожаров [Текст] / О. Н. Белорожев, А. В. Ермилов // Пожарная и аварийная безопасность. – 2017. – № 2(5). – С. 44–52.

131. Ольховский, И. А. Разработка пожарного автомобиля с системой обеспечения работоспособности насосно-рукавных систем при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в условиях низких температур [Текст] / И. А. Ольховский, О. В. Двоенко, И. А. Гусев // Школа молодых учёных и специалистов МЧС России : Материалы юбилейного X

форума. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – С. 30–33.

132. Богатов, Н. А. К вопросу о создании жидкости для пожаротушения в условиях крайне низких температур [Текст] / Н. А. Богатов, В. С. Болдырев, А. С. Савина [и др.] // Техносферная безопасность, проблемы и перспективы : Сборник трудов V международной научно-практической конференции. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2022. – С. 32–41.

133. *Keary, A. C. Analytical study of the effect of natural convection on cryogenic pipe freezing / A. C. Keary, R. J. Bowen // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1998. – Vol. 41. – No. 10. – P. 1129–1138.*

134. Тайсумов, Х. А. Современные проблемы использования пенообразователей для тушения пожаров [Текст] / Х. А. Тайсумов, В. П. Назаров, Н. Л. Присяжнюк [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 10(106). – С. 35–38.

135. Сараев, И. В. Восстановление боеготовности мобильных средств пожаротушения в условиях низких температур [Текст] / И. В. Сараев, А. Д. Семенов, А. Н. Бочкарев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 3(48). – С. 124–133.

136. Александров, С. С. Технологии пожаротушения в условиях крайнего севера [Текст] / С. С. Александров // Охрана труда и техносферная безопасность на объектах промышленности, транспорта и социальных инфраструктур : сборник статей II всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 36–39.

137. Шупнев, Д. С. Основные характеристики пожарных автомобилей, влияющие на успешное тушение пожара при низких температурах [Текст] / Д. С. Шупнев, И. И. Абубакиров, В. А. Неверов // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе : Материалы международной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – С. 276–277.

138. Жердев, А. В. Обоснование необходимости применения новых технологий для тушения торфяных пожаров [Текст] / А. В. Жердев, И. В. Андреев // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2018. – Т. 1. – С. 209–212.

139. Бабайцев, В. П. Развитие технических средств борьбы с пожарами, приспособленных для работы в условиях Крайнего севера [Текст] / В. П. Бабайцев, А. В. Дидимов, А. В. Воробьев // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Материалы международной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. – С. 809–811.

140. Маширова, А. Ю. Тушение пожаров и проведение аварийно-спасательных работ [Текст] / А. Ю. Маширова // Современные тенденции развития гуманитарных, правовых и экономических исследований Республики Калмыкия: теория и практика : Сборник материалов III Республиканской студенческой научно-практической конференции. – Элиста: Калмыцкий филиал Московского государственного гуманитарно-экономического университета, 2021. – С. 287–296.

141. Зайнидинов, А. С. Особенности тушения пожара на теплоэнергетических предприятиях [Текст] / А. С. Зайнидинов, А. Э. Великс, С. Д. Федоровский, А. А. Снежко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 11-5(74). – С. 142–145.

142. Ильясов, И. М. К вопросу об особенностях тушения пожаров в условиях низких температур [Текст] / И. М. Ильясов, С. Г. Аксенов // Студенческий форум. – 2022. – № 1-2(180). – С. 28–29.

143. Захарченко, М. Ю. Инновации в тушении пожаров в условиях низких температур воздуха [Текст] / М. Ю. Захарченко, К. К. Сейтенов, Р. И. Могутин, В. С. Лагун // Компетенция органов внутренних дел в обеспечении национальной безопасности: Сборник статей международной научно-практической конференции. – Волгоград: ИП Головченко Е. А., 2015. – С. 62–63.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ
КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ
СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ

Таблица 1 – Охлаждение компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам на длину 20 метров при режиме работы 5

№ измерения	Температура окружающей среды, °С	Температура входа, °С	Температура выхода, °С
1	-13,32	12,43	11,66
2	-13,69	12,40	11,52
3	-13,92	12,43	10,58
4	-14,02	12,30	10,34
5	-13,79	12,23	10,14
6	-13,59	12,19	9,60
7	-13,59	11,96	9,47
8	-13,55	11,89	9,37
9	-13,59	11,82	9,43
10	-13,59	11,62	9,50
11	-13,59	11,55	9,53
12	-13,55	11,49	9,40
13	-13,62	11,32	9,40
14	-13,79	11,28	9,33
15	-13,85	11,22	9,30
16	-13,96	10,98	9,37
17	-13,96	10,91	9,37
18	-13,92	10,85	8,79
19	-14,12	10,58	8,56
20	-14,19	10,64	8,36
21	-14,22	10,71	7,61
22	-14,26	10,71	7,41
23	-14,32	10,68	7,24
24	-14,36	10,61	6,77
25	-14,36	10,38	6,64
26	-14,39	10,34	6,54
27	-14,36	10,27	6,07
28	-14,42	10,00	6,00
29	-14,39	9,90	6,10
30	-14,42	9,84	6,12
31	-14,42	9,63	6,30
32	-14,42	9,60	6,21
33	-14,42	9,60	6,29
34	-14,39	9,63	6,27
35	-14,39	9,67	6,35
36	-14,42	9,70	6,15
37	-14,39	9,80	6,20
38	-14,42	9,80	6,29
39	-14,49	9,77	6,23
40	-14,49	9,70	6,03
41	-14,49	9,70	6,03

№ измерения	Температура окружающей среды, °С	Температура входа, °С	Температура выхода, °С
42	-14,52	9,70	6,17
43	-14,56	9,63	6,20
44	-14,59	9,63	6,20
45	-14,62	9,60	6,30
46	-14,59	9,53	6,34
47	-14,59	9,53	6,34
48	-14,56	9,50	6,44
49	-14,56	9,47	6,47
50	-14,56	9,43	6,47
51	-14,59	9,40	6,54
52	-14,59	9,37	6,54
53	-14,56	9,37	6,54
54	-14,76	9,33	6,57
55	-14,52	9,23	6,57
56	-14,49	9,23	6,61
57	-14,39	9,26	6,61
58	-14,02	9,16	6,61
59	-13,96	9,16	6,61
60	-13,96	9,13	6,64
61	-13,52	9,06	6,64
62	-13,75	9,06	6,64
63	-13,85	9,03	6,67
64	-13,92	8,96	6,61
65	-13,92	8,93	6,64
66	-14,06	8,93	6,64
67	-14,12	8,86	6,64
68	-14,09	8,86	6,64
69	-14,29	8,86	6,64
70	-14,26	8,76	6,64
71	-14,22	8,76	6,64
72	-14,22	8,73	6,67
73	-14,26	8,62	6,64
74	-14,26	8,62	6,64
75	-14,29	8,52	6,61
76	-14,32	8,49	6,64
77	-14,26	8,49	6,64
78	-14,26	8,39	6,67
79	-14,22	8,36	6,71
80	-14,26	8,36	6,74
81	-14,26	8,25	6,84
82	-14,29	8,25	6,87
83	-14,22	8,22	6,87
84	-13,99	8,22	6,94
85	-13,82	8,23	6,94
86	-13,82	8,24	6,98

Таблица 2 – Охлаждение компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам на длину 20 метров при режиме работы 9

№ измерения	Температура окружающей среды, °С	Температура входа, °С	Температура выхода, °С
1	-14,52	12,36	10,98
2	-14,49	12,36	11,02
3	-14,56	12,40	11,12
4	-14,62	12,46	11,12
5	-14,62	12,46	11,18
6	-14,66	12,50	11,25
7	-14,59	12,53	11,28
8	-14,59	12,53	11,28
9	-14,59	12,57	11,32
10	-14,59	12,57	11,32
11	-14,59	12,57	11,32
12	-14,56	12,60	11,35
13	-14,49	12,70	11,39
14	-14,52	12,77	11,35
15	-14,52	12,77	11,39
16	-14,56	12,87	11,39
17	-14,59	12,90	11,39
18	-14,66	12,94	11,39
19	-14,62	13,00	11,39
20	-14,62	13,00	11,39
21	-14,59	13,04	11,39
22	-14,66	13,07	11,39
23	-14,66	13,10	11,35
24	-14,62	13,14	11,55
25	-14,62	13,14	11,59
26	-14,62	13,14	11,62
27	-14,62	13,10	11,72
28	-14,59	13,10	11,76
29	-14,59	13,07	11,76
30	-14,56	13,04	11,82
31	-14,52	12,73	11,82
32	-14,56	12,73	11,82
33	-14,56	12,70	11,86
34	-14,52	12,67	11,89
35	-14,52	12,70	11,89
36	-14,56	12,70	11,89
37	-14,56	12,83	11,92
38	-14,59	12,87	11,92
39	-14,59	12,90	11,96
40	-14,79	13,00	11,92
41	-14,76	12,97	11,92

№ измерения	Температура окружающей среды, °С	Температура входа, °С	Температура выхода, °С
42	-14,79	13,00	11,92
43	-14,82	13,07	11,92
44	-14,79	13,07	11,92
45	-14,79	13,07	11,96
46	-14,69	13,07	11,92
47	-14,66	13,10	11,92
48	-14,69	13,10	11,92
49	-14,72	13,14	11,89
50	-14,72	13,17	11,92
51	-14,72	13,14	11,89
52	-14,69	13,17	11,89
53	-14,69	13,21	11,89
54	-14,69	13,21	11,82
55	-14,66	13,21	11,82
56	-14,62	13,21	11,79
57	-14,66	13,21	11,72
58	-14,66	13,24	11,69
59	-14,62	13,24	11,69
60	-14,59	13,24	11,66
61	-14,59	13,17	11,62
62	-14,59	13,14	11,59
63	-14,56	13,07	11,59
64	-14,56	12,94	11,55
65	-14,56	12,94	11,55
66	-14,59	12,94	11,52
67	-14,62	13,04	11,49
68	-14,56	13,04	11,52
69	-14,56	13,07	11,59
70	-14,52	13,10	11,55
71	-14,46	13,10	11,62
72	-14,26	13,10	11,66
73	-14,19	13,10	11,66
74	-14,09	13,10	11,69
75	-14,06	13,14	11,72
76	-14,02	13,17	11,72
77	-14,12	13,17	11,82
78	-14,12	13,17	11,82
79	-14,12	13,17	11,86
80	-14,19	13,17	11,92
81	-14,29	13,17	11,89
82	-14,36	13,17	11,92
83	-14,39	13,21	11,96
84	-14,42	13,21	11,99
85	-14,46	13,21	11,99
86	-14,46	13,21	11,99

№ измерения	Температура окружающей среды, °С	Температура входа, °С	Температура выхода, °С
87	-14,52	13,24	12,03
88	-14,52	13,21	11,99
89	-14,56	13,21	12,06
90	-14,59	13,21	12,06
91	-14,36	13,24	12,09
92	-14,29	13,24	12,13
93	-14,22	13,24	12,13

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ
КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ
СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ВЕТРА

Таблица 1 - Изменение температуры компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам при температуре окружающей среды -10 °С

Начальная температура КП 25 °С

Пожарный рукав диаметром 50 мм

Скорость ветра – 1 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	160	200	280	420	580
Кратность										
2	23,66	22,38	21,44	19,95	18,81	15,63	13,72	10,30	5,46	1,32
5	23,18	21,46	19,83	18,28	16,82	12,86	10,55	6,61	1,44	
10	21,58	18,51	15,73	13,22	10,95	5,40	2,55	-1,67		
15	20,39	16,38	12,91	9,89	7,27	1,31	-1,47			
20	17,54	11,68	7,06	3,42	0,56					

Скорость ветра – 5 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	160	200	280	420	580
Кратность										
2	23,52	22,11	20,76	19,46	18,22	14,81	12,76	9,16	4,18	0,05
5	22,99	21,09	19,31	17,63	16,04	11,81	9,38	5,30	0,11	
10	21,23	17,88	14,88	12,20	9,82	4,09	1,22			
15	19,91	15,56	11,84	8,67	5,95	-0,03				
20	16,82	10,56	5,76	2,08	-0,73					

Скорость ветра – 10 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	160	200	280	420	560
Кратность										
2	23,49	22,05	20,67	19,35	18,09	14,61	12,54	8,91	3,89	0,21
5	22,94	21,01	19,19	17,47	15,86	11,57	9,11	5,01	-0,17	
10	21,15	17,73	14,68	11,97	9,56	3,79	0,93			
15	19,80	15,37	11,60	8,39	5,66	-0,33				
20	16,66	10,31	5,46	1,78	-1,02					

Скорость ветра – 15 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	160	200	280	420	560
Кратность										
2	23,47	22,02	20,63	19,30	18,03	14,53	12,45	8,79	3,77	0,09
5	22,92	20,97	19,13	17,41	15,78	11,46	9,00	4,88	-0,30	
10	21,11	17,66	14,60	11,87	9,44	3,67	0,81			
15	19,75	15,29	11,50	8,27	5,53	-0,45				
20	16,58	10,19	5,34	1,65	-1,14					

Скорость ветра – 20 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	160	200	280	420	560
Кратность										
2	23,47	22,01	20,61	19,27	17,99	14,48	12,39	8,73	3,70	0,025
5	22,91	20,95	19,11	17,37	15,74	11,41	8,93	4,81	-0,36	
10	21,09	17,63	14,55	11,81	9,38	3,59	0,73			
15	19,72	15,24	11,43	8,21	5,46	-0,53				
20	16,54	10,13	5,27	1,58	-1,21					

Таблица 2 – Изменение температуры компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам при температуре окружающей среды -20 °С

Начальная температура КП 25 °С

Пожарный рукав диаметром 50 мм

Скорость ветра – 1 м/с

Расстояние	Изменение температуры, °С									
	20	40	60	80	100	120	140	200	280	360
Кратность										
2	23,28	21,63	20,04	18,51	17,04	15,63	14,27	10,50	6,10	2,34
5	22,66	20,45	18,36	16,37	14,48	12,70	11,00	6,42	1,36	
10	20,61	16,65	13,08	9,86	6,94	4,32	1,95			
15	19,07	13,92	9,45	5,57	2,21	-0,72				
20	15,41	7,87	1,93							

Скорость ветра – 5 м/с

Расстояние	Изменение температуры, °С									
	20	40	60	80	100	120	140	200	280	360
Кратность										
2	23,10	21,29	19,55	17,88	16,29	14,76	13,30	9,27	4,64	0,74
5	22,41	19,98	17,69	15,52	13,48	11,56	9,75	4,92	-0,32	
10	20,16	15,84	11,99	8,55	5,48	2,74	0,30			
15	18,45	12,86	8,09	4,00	0,52	-2,46				
20	14,50	6,43	0,26							

Скорость ветра – 10 м/с

Расстояние	Изменение температуры, °С									
	20	40	60	80	100	120	140	200	280	360
Кратность										
2	23,06	21,21	19,43	17,74	16,11	14,56	13,07	8,98	4,31	0,38
5	22,35	19,87	17,53	15,32	13,25	11,30	9,46	4,57	-0,70	
10	20,05	15,65	11,74	8,25	5,14	2,38	-0,07			
15	18,31	12,62	7,77	3,65	0,14					
20	14,27	6,10	-0,11							

Скорость ветра – 15 м/с

Расстояние	Изменение температуры, °С									
	20	40	60	80	100	120	140	200	280	360
Кратность										
2	23,04	21,17	19,38	17,67	16,04	14,47	12,98	8,86	4,16	0,23
5	22,33	19,82	17,46	15,24	13,15	11,19	9,34	4,43	-0,86	
10	20,01	15,57	11,63	8,12	5,00	2,23	-0,23			
15	18,25	12,51	7,64	3,50	-0,02					
20	14,18	5,96	-0,27							

Скорость ветра – 20 м/с

Расстояние	Изменение температуры, °С									
	20	40	60	80	100	120	140	200	280	360
Кратность										
2	23,03	21,15	19,35	17,63	16,00	14,42	12,92	8,79	4,08	0,14
5	22,31	19,79	17,42	1,19	13,09	11,12	9,27	4,34	-0,96	
10	19,98	15,52	11,56	8,04	4,92	2,14	-0,32			
15	18,21	12,45	7,56	3,40	-0,12					
20	14,13	5,88	-0,36							

Таблица 3 – Изменение температуры компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам при температуре окружающей среды -30 °С

Начальная температура КП 25 °С

Пожарный рукав диаметром 50 мм

Скорость ветра – 1 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	120	140	200	240	300
Кратность										
2	22,90	20,88	18,94	17,07	15,27	13,55	11,88	7,27	4,48	0,68
5	22,14	19,44	16,88	14,45	12,15	9,96	7,89	2,30	-0,95	
10	19,64	14,80	10,43	6,49	2,93	-0,27				
15	17,75	11,46	6,00	1,25						
20	13,28	4,06								

Скорость ветра – 5 м/с

	Изменение температуры, °С									
Расстояние	20	40	60	80	100	120	140	200	240	280
Кратность										
2	22,68	20,46	18,34	16,30	14,35	12,48	10,70	5,77	2,82	0,11
5	21,84	18,86	16,06	13,42	10,93	8,58	6,34	0,46		
10	19,08	13,81	9,10	4,89	1,14	-2,20				
15	17,00	10,17	4,33	-0,65						
20	12,15	2,31	-5,22							

Приложение В
(справочное)

ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ МОДЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Таблица 1 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -10 °С, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	L ² , м ²	T ² , °C ²	L*T _{ср.} , м·°C ²	(T-T _{ср.}) ² , °C ²	(L-L _{ср.}), °C	Линейная, °C	SD, °C	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	17,99	18,26	18,44	18,23	18,23	400	332,3	364,6	14,67	2500	18,13	1,5	16,8	19,5
2	30	17,36	17,7	17,09	17,38	17,38	900	302,1	521,4	8,88	1600	17,43	1,3	16,3	18,6
3	40	16,51	16,66	16,5	16,56	16,56	1600	274,2	662,4	4,67	900	16,73	1,1	15,8	17,7
4	50	15,6	15,89	15,8	15,76	15,76	2500	248,4	788	1,85	400	16,03	0,9	15,2	16,8
5	60	14,86	15,28	14,84	14,99	14,99	3600	224,7	899,4	0,35	100	15,33	0,9	14,5	16,1
6	70	14,04	14,45	14,24	14,24	14,24	4900	202,8	996,8	0,03	0	14,63	0,9	13,8	15,4
7	80	13,34	13,6	13,61	13,52	13,52	6400	182,8	1081,6	0,77	100	13,93	0,9	13,1	14,7
8	90	12,68	12,85	12,89	12,81	12,81	8100	164,1	1152,9	2,53	400	13,23	1	12,4	14,1
9	100	12,08	12,29	12,01	12,13	12,13	10000	147,1	1213	5,15	900	12,53	1,1	11,6	13,5
10	110	11,43	11,67	11,28	11,46	11,46	12100	131,3	1260,6	8,64	1600	11,83	1,3	10,7	13
11	120	10,77	10,83	10,86	10,82	10,82	14400	117,1	1298,4	12,82	2500	11,13	1,5	9,8	12,5
Средние	70	14,2	14,5	14,3	14,4	14,4	5900	211,5	930,8	5,5	1000	14,6	1,3	13,6	15,6
Сумма	770	156,7	159,5	157,6	157,9	157,9	64900	2326,9	10239,1	60,4	11000	160,9	12,4	150	171,9

$b = 19,53$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,07$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 2,59$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 2 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -15 °С, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L * T_{ср.}, м * °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	SD, °C	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	18,13	17,82	17,85	18,22	17,93	400	321,5	358,6	20,52	2500	17,68	1,8	16,1	19,3
2	30	16,74	16,63	17,46	16,63	16,94	900	287	508,2	12,53	1600	16,78	1,5	15,5	18,1
3	40	15,95	15,88	16,13	15,38	15,99	1600	255,7	639,6	6,71	900	15,88	1,3	14,7	17
4	50	15,02	14,96	15,19	14,33	15,06	2500	226,8	753	2,76	400	14,98	1,1	14	15,9
5	60	14,02	13,88	14,57	13,39	14,16	3600	200,5	849,6	0,58	100	14,08	1	13,2	15
6	70	13,27	13,09	13,48	12,54	13,28	4900	176,4	929,6	0,01	0	13,18	1	12,3	14,1
7	80	12,43	12,33	12,54	11,75	12,43	6400	154,5	994,4	0,94	100	12,28	1,1	11,3	13,2
8	90	11,55	11,6	11,68	11,01	11,61	8100	134,8	1044,9	3,2	400	11,38	1,2	10,3	12,4
9	100	10,77	10,64	11,04	10,29	10,82	10000	117,1	1082	6,66	900	10,48	1,3	9,3	11,6
10	110	9,88	9,97	10,27	9,61	10,04	12100	100,8	1104,4	11,29	1600	9,58	1,5	8,3	10,9
11	120	9,16	9,29	9,42	8,96	9,29	14400	86,3	1114,8	16,89	2500	8,68	1,7	7,2	10,2
Средние	70	13,4	13,3	13,6	12,9	13,4	5900	187,4	852,6	7,5	1000	13,2	1,5	12	14,3
Сумма	770	146,9	146,1	149,6	142,1	147,6	64900	2061,4	9379,1	82,1	11000	145	14,5	132,2	157,7

$b = 19,48$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,09$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 3,02$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 3 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -20 °С, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{ср.}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	SD, °C	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	17,49	17,7	17,72	17,59	17,64	400	311,2	352,8	26,42	2500	17,38	2	15,6	19,1
2	30	16,5	16,51	16,52	16	16,51	900	272,6	495,3	16,08	1600	16,38	1,7	14,9	17,9
3	40	15,17	15,54	15,53	14,75	15,41	1600	237,5	616,4	8,47	900	15,38	1,4	14,1	16,6
4	50	14,17	14,62	14,27	13,7	14,35	2500	205,9	717,5	3,42	400	14,38	1,3	13,2	15,5
5	60	13,14	13,44	13,39	12,76	13,32	3600	177,4	799,2	0,67	100	13,38	1,2	12,3	14,4
6	70	12,18	12,51	12,27	11,91	12,32	4900	151,8	862,4	0,03	0	12,38	1,2	11,3	13,4
7	80	11,18	11,43	11,45	11,12	11,35	6400	128,8	908	1,32	100	11,38	1,2	10,3	12,4
8	90	10,29	10,58	10,37	10,37	10,41	8100	108,4	936,9	4,37	400	10,38	1,3	9,2	11,5
9	100	9,35	9,57	9,58	9,66	9,5	10000	90,3	950	9	900	9,38	1,5	8,1	10,7
10	110	8,46	8,73	8,67	8,98	8,62	12100	74,3	948,2	15,05	1600	8,38	1,7	6,9	9,9
11	120	7,62	7,81	7,85	8,33	7,76	14400	60,2	931,2	22,47	2500	7,38	2	5,6	9,1
Средние	70	12,3	12,6	12,5	12,3	12,5	5900	165,3	774,4	9,8	1000	12,4	1,7	11	13,7
Сумма	770	135,6	138,4	137,6	135,2	137,2	64900	1818,4	8517,9	107,3	11000	136,2	16,5	121,5	150,5

$b = 19,38$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,1$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 3,45$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 4 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -25 °С, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{ср.}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	17,5	17,19	17,33	17,54	17,34	400	300,7	346,8	34,11	2500	17,08	2,3	15,1	19,1
2	30	16,31	15,84	16,07	15,95	16,07	900	258,2	482,1	20,88	1600	15,98	1,9	14,3	17,7
3	40	15,07	14,57	14,88	14,71	14,84	1600	220,2	593,6	11,16	900	14,88	1,6	13,5	16,3
4	50	13,87	13,65	13,42	13,65	13,65	2500	186,3	682,5	4,62	400	13,78	1,4	12,5	15
5	60	12,5	12,29	12,67	12,72	12,49	3600	156	749,4	0,98	100	12,68	1,3	11,5	13,8
6	70	11,52	11,26	11,31	11,86	11,36	4900	129	795,2	0,02	0	11,58	1,3	10,4	12,7
7	80	10,43	10,19	10,19	10,92	10,27	6400	105,5	821,6	1,51	100	10,48	1,4	9,2	11,7
8	90	9,35	9,08	9,21	9,85	9,21	8100	84,8	828,9	5,24	400	9,38	1,5	8,1	10,7
9	100	8,27	8,18	8,12	9	8,19	10000	67,1	819	10,96	900	8,28	1,7	6,8	9,8
10	110	7,33	7,18	7,07	8,02	7,19	12100	51,7	790,9	18,58	1600	7,18	1,9	5,5	8,9
11	120	6,33	6,13	6,23	7,23	6,23	14400	38,8	747,6	27,77	2500	6,08	2,2	4,1	8
Средние	70	11,7	11,4	11,5	12	11,5	5900	145,3	696,1	12,3	1000	11,6	1,9	10,1	13,1
Сумма	770	128,5	125,6	126,5	131,5	126,8	64900	1598,3	7657,6	135,8	11000	127,4	18,5	111	143,7

$b = 19,28$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,11$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 3,88$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_{p,r} = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 5 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -30°C , кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, \text{м}^2$	$T^2, ^{\circ}\text{C}^2$	$L \cdot T_{\text{ср}}, \text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}^2$	$(T - T_{\text{ср}})^2, ^{\circ}\text{C}^2$	$(L - L_{\text{ср}}), ^{\circ}\text{C}$	Линейная, $^{\circ}\text{C}$	$S_{\Delta}, ^{\circ}\text{C}$	МИН, $^{\circ}\text{C}$	МАКС, $^{\circ}\text{C}$
1	20	16,79	17,11	17,24	16,56	17,05	400	290,7	341	41,6	2500	16,82	2,5	14,6	19
2	30	15,63	15,87	15,41	14,87	15,64	900	244,6	469,2	25,4	1600	15,62	2,1	13,8	17,5
3	40	14,04	14,29	14,47	13,52	14,27	1600	203,6	570,8	13,47	900	14,42	1,8	12,8	16
4	50	12,86	13,02	12,94	12,37	12,94	2500	167,4	647	5,48	400	13,22	1,6	11,8	14,6
5	60	11,64	11,79	11,52	11,33	11,65	3600	135,7	699	1,1	100	12,02	1,5	10,7	13,3
6	70	10,36	10,51	10,34	10,38	10,4	4900	108,2	728	0,04	0	10,82	1,4	9,6	12,1
7	80	9,11	9,36	9,11	9,49	9,19	6400	84,5	735,2	1,99	100	9,62	1,5	8,3	10,9
8	90	8,01	8,15	7,89	8,64	8,02	8100	64,3	721,8	6,66	400	8,42	1,7	6,9	9,9
9	100	6,77	6,97	6,89	7,83	6,88	10000	47,3	688	13,84	900	7,22	1,9	5,5	8,9
10	110	5,75	5,79	5,77	7,05	5,77	12100	33,3	634,7	23,33	1600	6,02	2,2	4,1	8
11	120	4,61	4,72	4,77	6,3	4,7	14400	22,1	564	34,81	2500	4,82	2,5	2,6	7
Средние	70	10,5	10,7	10,6	10,8	10,6	5900	127,4	618,1	15,2	1000	10,8	2,1	9,2	12,5
Сумма	770	115,6	117,6	116,4	118,3	116,5	64900	1401,7	6798,7	167,7	11000	119	20,7	100,7	137,2

$b = 19,22$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,12$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 4,32$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_p = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 6 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -35°C , кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, \text{м}^2$	$T^2, ^{\circ}\text{C}^2$	$L \cdot T_{\text{ср}}, \text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}^2$	$(T - T_{\text{ср}})^2, ^{\circ}\text{C}^2$	$(L - L_{\text{ср}}), ^{\circ}\text{C}$	Линейная, $^{\circ}\text{C}$	$S_{\Delta}, ^{\circ}\text{C}$	МИН, $^{\circ}\text{C}$	МАКС, $^{\circ}\text{C}$
1	20	17,04	16,77	16,45	16,42	16,75	400	280,6	335	51,12	2500	16,32	2,8	13,9	18,8
2	30	15,31	15,32	14,96	14,53	15,2	900	231	456	31,36	1600	14,92	2,4	12,8	17
3	40	13,7	13,94	13,45	12,99	13,7	1600	187,7	548	16,81	900	13,52	2	11,8	15,3
4	50	12,05	12,46	12,19	11,63	12,23	2500	149,6	611,5	6,92	400	12,12	1,7	10,6	13,6
5	60	10,92	10,85	10,67	10,4	10,81	3600	116,9	648,6	1,46	100	10,72	1,6	9,3	12,1
6	70	9,48	9,49	9,36	9,25	9,44	4900	89,1	660,8	0,03	0	9,32	1,6	7,9	10,7
7	80	8,2	8,13	8,01	8,15	8,11	6400	65,8	648,8	2,22	100	7,92	1,7	6,4	9,4
8	90	6,84	6,93	6,69	7,11	6,82	8100	46,5	613,8	7,73	400	6,52	1,8	4,9	8,1
9	100	5,59	5,62	5,48	6,1	5,56	10000	30,9	556	16,32	900	5,12	2,1	3,3	7
10	110	4,37	4,36	4,33	5,12	4,35	12100	18,9	478,5	27,56	1600	3,72	2,4	1,6	5,8
11	120	3,17	3,21	3,13	4,16	3,17	14400	10	380,4	41,34	2500	2,32	2,7	-0,1	4,7
Средние	70	9,7	9,7	9,5	9,6	9,6	5900	111,5	539,8	18,4	1000	9,3	2,3	7,5	11,1
Сумма	770	106,7	107,1	104,7	105,9	106,1	64900	1227	5937,4	202,9	11000	102,5	22,8	82,4	122,5

$b = 19,12$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,14$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 4,75$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_{p} = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 7 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -10°C , кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель	Среднее	L 2	T2	L*Тср	(T-Тср)2	(L-Lср)2	Линейная	SD	МИН	МАКС
1	20	17,71	17,47	17,74	17,91	17,64	400	311,2	352,8	24,4	2500	17,42	1,9	16,1	18,8
2	30	16,8	16,53	16,26	16,22	16,53	900	273,2	495,9	14,67	1600	16,52	1,6	15,4	17,6
3	40	15,74	15,23	15,42	15,22	15,46	1600	239	618,4	7,62	900	15,62	1,3	14,7	16,5
4	50	14,65	14,25	14,42	14,31	14,44	2500	208,5	722	3,03	400	14,72	1,2	13,9	15,6
5	60	13,67	13,22	13,49	13,55	13,46	3600	181,2	807,6	0,58	100	13,82	1,1	13,1	14,6
6	70	12,58	12,27	12,7	12,78	12,52	4900	156,8	876,4	0,03	0	12,92	1,1	12,2	13,7
7	80	11,82	11,57	11,45	11,57	11,61	6400	134,8	928,8	1,19	100	12,02	1,1	11,3	12,8
8	90	10,93	10,6	10,7	10,42	10,74	8100	115,3	966,6	3,84	400	11,12	1,3	10,2	12
9	100	9,93	9,81	9,99	9,54	9,91	10000	98,2	991	7,78	900	10,22	1,4	9,2	11,2
10	110	9,28	9,1	8,96	8,97	9,11	12100	83	1002,1	12,89	1600	9,32	1,6	8,2	10,4
11	120	8,4	8,34	8,29	7,65	8,34	14400	69,6	1000,8	19,01	2500	8,42	1,9	7,1	9,8
Средние	70	12,9	12,6	12,7	12,6	12,7	5900	170,1	796,6	8,6	1000	12,9	1,6	11,9	13,9
Сумма	770	141,5	138,4	139,4	138,1	139,8	64900	1870,8	8762,4	95	11000	142,1	15,5	131,4	153

$b = 19,22$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,09$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 3,25$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности.

Таблица 8 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -15°C , кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, \text{м}^2$	$T^2, ^{\circ}\text{C}^2$	$L \cdot T_{\text{ср}}, \text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}^2$	$(T - T_{\text{ср}})^2, ^{\circ}\text{C}^2$	$(L - L_{\text{ср}}), ^{\circ}\text{C}$	Линейная, $^{\circ}\text{C}$	$S\Delta, ^{\circ}\text{C}$	МИН, $^{\circ}\text{C}$	МАКС, $^{\circ}\text{C}$
1	20	17,51	17,01	17,21	17,11	17,24	400	297,2	344,8	32,95	2500	16,86	2,2	14,9	18,8
2	30	15,86	15,8	16,2	15,39	15,95	900	254,4	478,5	19,8	1600	15,76	1,9	14,1	17,4
3	40	14,66	14,65	14,81	14,01	14,71	1600	216,4	588,4	10,3	900	14,66	1,6	13,3	16,1
4	50	13,48	13,33	13,74	12,82	13,52	2500	182,8	676	4,08	400	13,56	1,4	12,3	14,8
5	60	12,29	12,17	12,65	11,76	12,37	3600	153	742,2	0,76	100	12,46	1,3	11,3	13,6
6	70	11,16	11,06	11,59	10,78	11,27	4900	127	788,9	0,05	0	11,36	1,3	10,2	12,5
7	80	10,09	10,09	10,47	9,85	10,22	6400	104,4	817,6	1,64	100	10,26	1,3	9,1	11,4
8	90	9,17	9,17	9,27	8,98	9,2	8100	84,6	828	5,29	400	9,16	1,5	7,8	10,5
9	100	8,14	8,08	8,47	8,14	8,23	10000	67,7	823	10,69	900	8,06	1,7	6,6	9,6
10	110	7,19	7,29	7,41	7,33	7,3	12100	53,3	803	17,64	1600	6,96	1,9	5,3	8,6
11	120	6,34	6,34	6,53	6,54	6,4	14400	41	768	26,01	2500	5,86	2,2	3,9	7,8
Средние	70	11,4	11,4	11,7	11,2	11,5	5900	143,8	696,2	11,7	1000	11,4	1,8	9,9	12,8
Сумма	770	125,9	125	128,4	122,7	126,4	64900	1581,8	7658,4	129,2	11000	125	18,3	108,8	141,1

$b = 19,06$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,11$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 3,79$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_{p,r} = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 9 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -20, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{cp}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{cp})^2, °C^2$	$(L - L_{cp}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	17	16,69	16,87	16,53	16,85	400	283,9	337	42,9	2500	16,52	2,5	14,3	18,7
2	30	15,49	15,24	15,38	14,74	15,37	900	236,2	461,1	25,7	1600	15,32	2,1	13,5	17,2
3	40	14,1	13,68	14,08	13,3	13,95	1600	194,6	558	13,32	900	14,12	1,8	12,5	15,7
4	50	12,82	12,35	12,59	12,04	12,59	2500	158,5	629,5	5,24	400	12,92	1,6	11,5	14,3
5	60	11,35	11,2	11,3	10,91	11,28	3600	127,2	676,8	0,96	100	11,72	1,5	10,4	13
6	70	10,14	9,98	9,95	9,86	10,02	4900	100,4	701,4	0,08	0	10,52	1,4	9,3	11,8
7	80	8,88	8,69	8,88	8,86	8,82	6400	77,8	705,6	2,19	100	9,32	1,5	8	10,6
8	90	7,73	7,53	7,72	7,92	7,66	8100	58,7	689,4	6,97	400	8,12	1,7	6,6	9,6
9	100	6,59	6,54	6,52	7,01	6,55	10000	42,9	655	14,06	900	6,92	1,9	5,2	8,6
10	110	5,59	5,42	5,44	6,13	5,48	12100	30	602,8	23,23	1600	5,72	2,2	3,8	7,7
11	120	4,46	4,43	4,48	5,27	4,46	14400	19,9	535,2	34,11	2500	4,52	2,5	2,3	6,7
Средние	70	10,4	10,2	10,3	10,2	10,3	5900	120,9	595,6	15,3	1000	10,5	2,1	8,9	12,2
Сумма	770	114,2	111,8	113,2	112,6	113	64900	1330,1	6551,8	168,8	11000	115,7	20,7	97,4	133,9

$b = 18,92$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,12$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 4,33$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 10 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -25, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{cp}, м \cdot °C^2$	$(T-T_{cp})^2, °C^2$	$(L-L_{cp}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	16,3	16,18	16,3	15,84	16,26	400	264,4	325,2	52,71	2500	15,78	2,8	13,3	18,2
2	30	14,51	14,66	14,51	14,08	14,56	900	212	436,8	30,91	1600	14,38	2,4	12,3	16,5
3	40	13,06	12,94	13,06	12,67	13,02	1600	169,5	520,8	16,16	900	12,98	2	11,2	14,7
4	50	11,61	11,66	11,61	11,44	11,63	2500	135,3	581,5	6,92	400	11,58	1,8	10	13,2
5	60	10,05	10,12	10,05	10,34	10,07	3600	101,4	604,2	1,14	100	10,18	1,6	8,8	11,6
6	70	8,61	8,61	8,61	9,32	8,61	4900	74,1	602,7	0,15	0	8,78	1,6	7,4	10,2
7	80	7,28	7,39	7,28	8,35	7,32	6400	53,6	585,6	2,82	100	7,38	1,7	5,9	8,9
8	90	6,02	6,08	6,02	7,22	6,04	8100	36,5	543,6	8,76	400	5,98	1,9	4,3	7,7
9	100	4,85	4,77	4,85	5,87	4,82	10000	23,2	482	17,47	900	4,58	2,1	2,7	6,4
10	110	3,66	3,62	3,66	4,71	3,65	12100	13,3	401,5	28,62	1600	3,18	2,4	1,1	5,3
11	120	2,49	2,51	2,47	3,02	2,49	14400	6,2	298,8	42,38	2500	1,78	2,8	-0,7	4,2
Средние	70	8,9	9	8,9	9,4	9	5900	99	489,3	18,9	1000	8,8	2,3	6,9	10,6
Сумма	770	98,4	98,5	98,4	102,9	98,5	64900	1089,5	5382,7	208	11000	96,6	23,1	76,3	116,9

$b = 18,58$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,14$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 4,81$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_p = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 11 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -30, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{cp}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{cp})^2, °C^2$	$(L - L_{cp}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	16,41	15,9	16,26	15,86	16,19	400	262,1	323,8	63,84	2500	15,75	3,1	13	18,5
2	30	14,42	14,37	14,39	13,9	14,39	900	207,1	431,7	38,32	1600	14,25	2,6	12	16,5
3	40	12,79	12,51	12,7	12,28	12,67	1600	160,5	506,8	19,98	900	12,75	2,2	10,8	14,7
4	50	11,22	10,87	10,94	10,86	11,01	2500	121,2	550,5	7,9	400	11,25	1,9	9,6	12,9
5	60	9,49	9,28	9,48	9,55	9,42	3600	88,7	565,2	1,49	100	9,75	1,8	8,2	11,3
6	70	8,04	7,87	7,74	8,33	7,88	4900	62,1	551,6	0,1	0	8,25	1,8	6,7	9,8
7	80	6,43	6,35	6,45	7,17	6,41	6400	41,1	512,8	3,2	100	6,75	1,9	5,1	8,4
8	90	5,09	4,94	4,95	6,05	4,99	8100	24,9	449,1	10,3	400	5,25	2,1	3,4	7,1
9	100	3,68	3,59	3,63	4,97	3,63	10000	13,2	363	20,88	900	3,75	2,3	1,7	5,8
10	110	2,36	2,29	2,33	3,92	2,33	12100	5,4	256,3	34,46	1600	2,25	2,6	0	4,5
11	120	1,08	1,06	1,08	2,9	1,07	14400	1,1	128,4	50,84	2500	0,75	3	-1,9	3,4
Средние	70	8,3	8,1	8,2	8,7	8,2	5900	89,8	421,7	22,8	1000	8,3	2,6	6,2	10,3
Сумма	770	91	89	90	95,8	90	64900	987,4	4639,2	251,3	11000	90,8	25,3	68,6	112,9

$b = 18,75$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,15$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 5,28$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_{p,r} = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 12 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -35, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{ср}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	15,94	15,52	15,96	14,97	15,81	400	250	316,2	77,62	2500	15,21	3,4	12,2	18,2
2	30	14,09	13,6	13,8	12,93	13,83	900	191,3	414,9	46,65	1600	13,51	2,9	11	16,1
3	40	11,95	11,74	12,11	11,23	11,93	1600	142,3	477,2	24,3	900	11,81	2,4	9,7	13,9
4	50	10,17	9,95	10,21	9,72	10,11	2500	102,2	505,5	9,67	400	10,11	2,1	8,3	12
5	60	8,49	8,3	8,28	8,34	8,36	3600	69,9	501,6	1,85	100	8,41	2	6,7	10,2
6	70	6,72	6,65	6,65	7,04	6,67	4900	44,5	466,9	0,11	0	6,71	1,9	5	8,4
7	80	5,14	4,99	5,03	5,79	5,05	6400	25,5	404	3,8	100	5,01	2	3,3	6,8
8	90	3,54	3,47	3,47	4,6	3,49	8100	12,2	314,1	12,32	400	3,31	2,3	1,3	5,3
9	100	2,03	1,96	2,01	3,15	2	10000	4	200	25	900	1,61	2,6	-0,7	3,9
10	110	0,57	0,55	0,56	1,81	0,56	12100	0,3	61,6	41,47	1600	-0,09	2,9	-2,6	2,5
11	120	-0,79	-0,8	-0,82	0,8	-0,8	14400	0,6	-96	60,84	2500	-1,79	3,3	-4,7	1,1
Средние	70	7,1	6,9	7	7,3	7	5900	76,6	324,2	27,6	1000	6,7	2,8	4,5	8,9
Сумма	770	77,9	75,9	77,3	80,4	77	64900	842,8	3566	303,6	11000	73,8	27,8	49,5	98,4

$b = 18,61$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,17$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 5,81$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_p = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 13 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -10, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{cp}, м \cdot °C^2$	$(T-T_{cp})^2, °C^2$	$(L-L_{cp}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	15,75	15,16	15,49	14,88	15,47	400	239,3	309,4	63,52	2500	14,56	3,1	11,8	17,3
2	30	13,63	13,22	13,54	12,99	13,46	900	181,2	403,8	35,52	1600	13,16	2,5	11	15,4
3	40	11,79	11,57	11,5	11,45	11,62	1600	135	464,8	16,97	900	11,76	2	10	13,5
4	50	10,04	9,87	9,84	10,09	9,92	2500	98,4	496	5,86	400	10,36	1,8	8,8	11,9
5	60	8,35	8,22	8,48	8,85	8,35	3600	69,7	501	0,72	100	8,96	1,7	7,5	10,5
6	70	6,91	6,91	6,91	7,7	6,91	4900	47,7	483,7	0,35	0	7,56	1,7	6,1	9,1
7	80	5,67	5,49	5,58	6,61	5,58	6400	31,1	446,4	3,69	100	6,16	1,8	4,6	7,7
8	90	4,4	4,27	4,39	5,56	4,35	8100	18,9	391,5	9,92	400	4,76	2	3	6,5
9	100	3,27	3,18	3,23	4,55	3,23	10000	10,4	323	18,23	900	3,36	2,2	1,4	5,3
10	110	2,21	2,18	2,17	3,57	2,19	12100	4,8	240,9	28,2	1600	1,96	2,4	-0,2	4,1
11	120	1,23	1,21	1,24	2,62	1,23	14400	1,5	147,6	39,31	2500	0,56	2,7	-1,8	2,9
Средние	70	7,6	7,4	7,5	8,1	7,5	5900	76,2	382,6	20,2	1000	7,6	2,4	5,7	9,5
Сумма	770	83,3	81,3	82,4	88,9	82,3	64900	838	4208,1	222,3	11000	83,2	23,9	62,2	104,2

$b = 17,36$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,14$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$S_e = 4,97$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$t_{pr} = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 11 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 14 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -15, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{cp}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{cp})^2, °C^2$	$(L - L_{cp}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	14,9	14,5	14,73	14,88	14,71	400	216,4	294,2	61	1600	13,92	3,4	10,9	17
2	30	12,6	12,26	12,26	12,99	12,37	900	153	371,1	29,92	900	12,12	2,7	9,7	14,6
3	40	10,28	10,07	10,32	11,45	10,22	1600	104,4	408,8	11,02	400	10,32	2,1	8,4	12,2
4	50	8,38	8,14	8,19	9,69	8,24	2500	67,9	412	1,8	100	8,52	1,9	6,8	10,2
5	60	6,47	6,29	6,47	8,15	6,41	3600	41,1	384,6	0,24	0	6,72	2	4,9	8,5
6	70	4,81	4,68	4,69	6,23	4,73	4900	22,4	331,1	4,71	100	4,92	2,1	3	6,8
7	80	3,18	3,15	3,2	4,3	3,18	6400	10,1	254,4	13,84	400	3,12	2,4	1	5,3
8	90	1,78	1,73	1,73	2,76	1,75	8100	3,1	157,5	26,52	900	1,32	2,8	-1,2	3,8
9	100	0,43	0,43	0,43	1,5	0,43	10000	0,2	43	41,86	1600	-0,48	3,1	-3,3	2,3
Средние	60	7	6,8	6,9	8	6,9	4266,7	68,7	295,2	21,2	666,7	6,7	2,6	4,5	9
Сумма	540	62,8	61,3	62	72	62	38400	618,6	2656,7	190,9	6000	60,5	22,5	40,2	80,7

$b = 17,52$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,18$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 5,22$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 1,83$ – Критерий Стьюдента при 9 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 15 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -20, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{ср}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	14,9	14,5	14,73	14,88	14,71	400	216,4	294,2	37,33	900	14,38	3,2	11,4	17,3
2	30	12,6	12,26	12,26	12,99	12,37	900	153	371,1	14,21	400	12,48	2,4	10,3	14,7
3	40	10,28	10,07	10,32	11,45	10,22	1600	104,4	408,8	2,62	100	10,58	1,9	8,8	12,3
4	50	8,38	8,14	8,19	9,69	8,24	2500	67,9	412	0,13	0	8,68	1,9	6,9	10,4
5	60	6,47	6,29	6,47	8,15	6,41	3600	41,1	384,6	4,8	100	6,78	2,3	4,7	8,9
6	70	4,81	4,68	4,69	6,23	4,73	4900	22,4	331,1	14,98	400	4,88	2,7	2,4	7,4
7	80	3,18	3,15	3,2	4,3	3,18	6400	10,1	254,4	29,38	900	2,98	3,2	0	5,9
Средние	50	8,7	8,4	8,6	9,7	8,6	2900	87,9	350,9	14,8	400	8,7	2,4	6,4	11
Сумма	350	60,6	59,1	59,9	67,7	59,9	20300	615,3	2456,2	103,5	2800	60,8	17,6	44,5	76,9

$b = 17,86$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,22$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 5,2$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 2,02$ – Критерий Стьюдента при 7 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 16 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -25, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{ср}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	14,9	14,5	14,73	14,88	14,71	400	216,4	294,2	18,58	400	14,57	3	11,6	17,5
2	30	12,6	12,26	12,26	12,99	12,37	900	153	371,1	3,88	100	12,47	2	10,5	14,4
3	40	10,28	10,07	10,32	11,45	10,22	1600	104,4	408,8	0,03	0	10,37	1,7	8,7	12
4	50	8,38	8,14	8,19	9,69	8,24	2500	67,9	412	4,67	100	8,27	2,3	6	10,5
5	60	6,47	6,29	6,47	8,15	6,41	3600	41,1	384,6	15,92	400	6,17	3,2	3	9,3
Средние	40	10,5	10,3	10,4	11,4	10,4	1800	116,6	374,1	8,6	200	10,4	2,2	8	12,7
Сумма	200	52,6	51,3	52	57,2	52	9000	582,8	1870,7	43,1	1000	51,9	12,2	39,8	63,7

$b = 18,24$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,27$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 4,88$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$r = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 2,35$ – Критерий Стьюдента при 50 попытках (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 17 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -30, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава, м	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель, град	Среднее, град	$L^2, м^2$	$T^2, °C^2$	$L \cdot T_{ср}, м \cdot °C^2$	$(T - T_{ср})^2, °C^2$	$(L - L_{ср}), °C$	Линейная, °C	$S\Delta, °C$	МИН, °C	МАКС, °C
1	20	12,48	12,33	12,52	11,18	12,44	400	154,8	248,8	37,7	400	12,17	4,3	8	16,4
2	30	9,24	9,06	9,02	8,49	9,11	900	83	273,3	7,9	100	9,17	2,9	6,3	12
3	40	6,04	5,93	6,12	6,14	6,03	1600	36,4	241,2	0,07	0	6,17	2,4	3,8	8,5
4	50	3,26	3,14	3,2	3,99	3,2	2500	10,2	160	9,61	100	3,17	3,2	0	6,3
5	60	0,6	0,59	0,58	1,95	0,59	3600	0,3	35,4	32,6	400	0,17	4,5	-4,2	4,6
Средние	40	6,3	6,2	6,3	6,4	6,3	1800	56,9	191,7	17,6	200	6,2	3,2	2,8	9,6
Сумма	200	31,6	31,1	31,4	31,8	31,4	9000	284,7	958,7	87,9	1000	30,9	17,3	13,9	47,8

$b = 18,17$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,3$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 5,41$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 2,35$ – Критерий Стьюдента при 5 опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

Таблица 18 - Сравнение экспериментальных данных при температуре -35, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

№	Длина рукава	1 эксп.	2 эксп.	3 эксп.	Модель	Среднее	L 2	T2	L*Tcp	(T-Tcp)2	(L-Lcp)2	Линейная	SΔ	МИН	МАКС
1	20	11,59	11,85	11,63	10,04	11,69	400	136,7	233,8	12,89	100	11,73	4,6	5,4	18,1
2	30	8	8,11	7,94	7,15	8,02	900	64,3	240,6	0,01	0	8,13	2,9	4,1	12,1
3	40	4,63	4,67	4,61	4,61	4,64	1600	21,5	185,6	11,97	100	4,53	4,5	-1,7	10,7
Средние	30	8,1	8,2	8,1	7,3	8,1	966,7	74,2	220	8,3	66,7	8,1	3,4	2,6	13,6
Сумма	90	24,2	24,6	24,2	21,8	24,4	2900	222,5	660	24,9	200	24,4	12	7,8	40,9

$b = 18,93$ – Свободный коэффициент линейной модели;

$a = -0,36$ – Коэффициент при аргументе линейной модели;

$Se = 4,99$ – Стандартная ошибка измерений в эксперименте;

$p = 0,95$ – Доверительная вероятность;

$tr = 6,31$ – Критерий Стьюдента при 5опытах (по 3 измерения) и доверительной вероятности

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(справочное)

ЗАВИСИМОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПО ДЛИНЕ
НАСОСНО-РУКАВНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

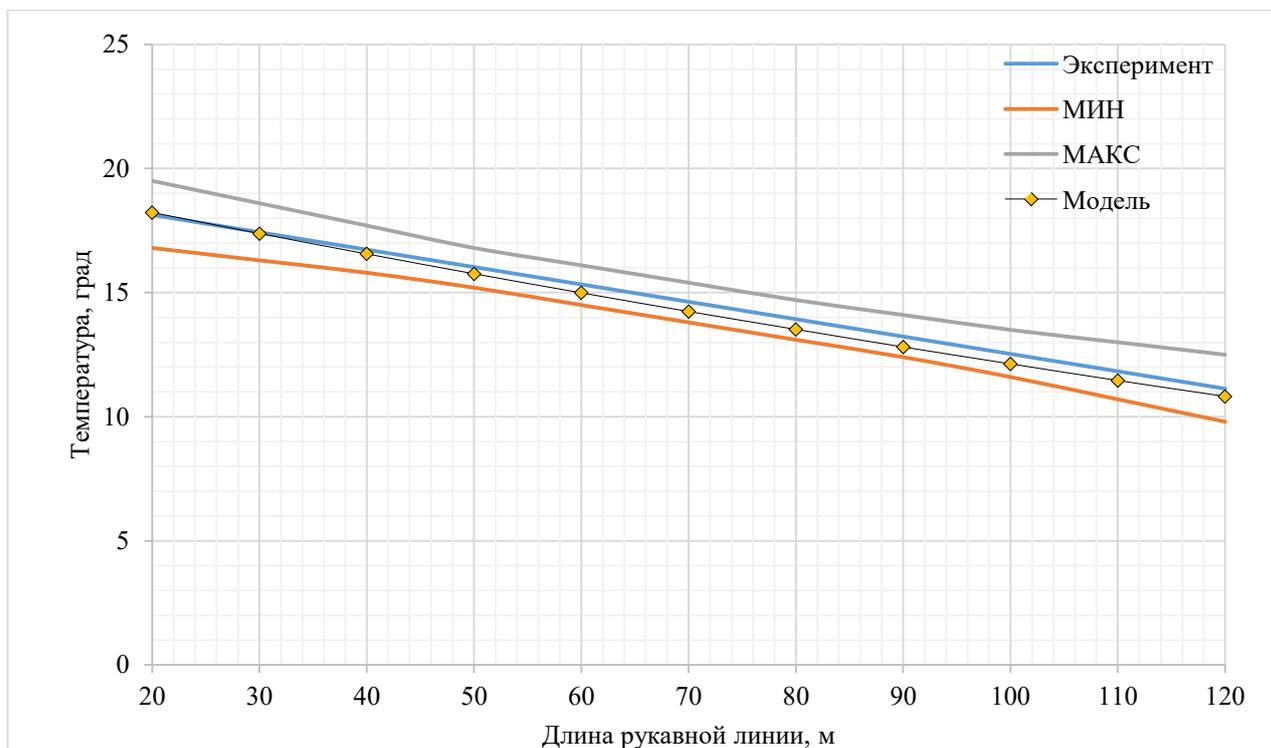


Рисунок 1- Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

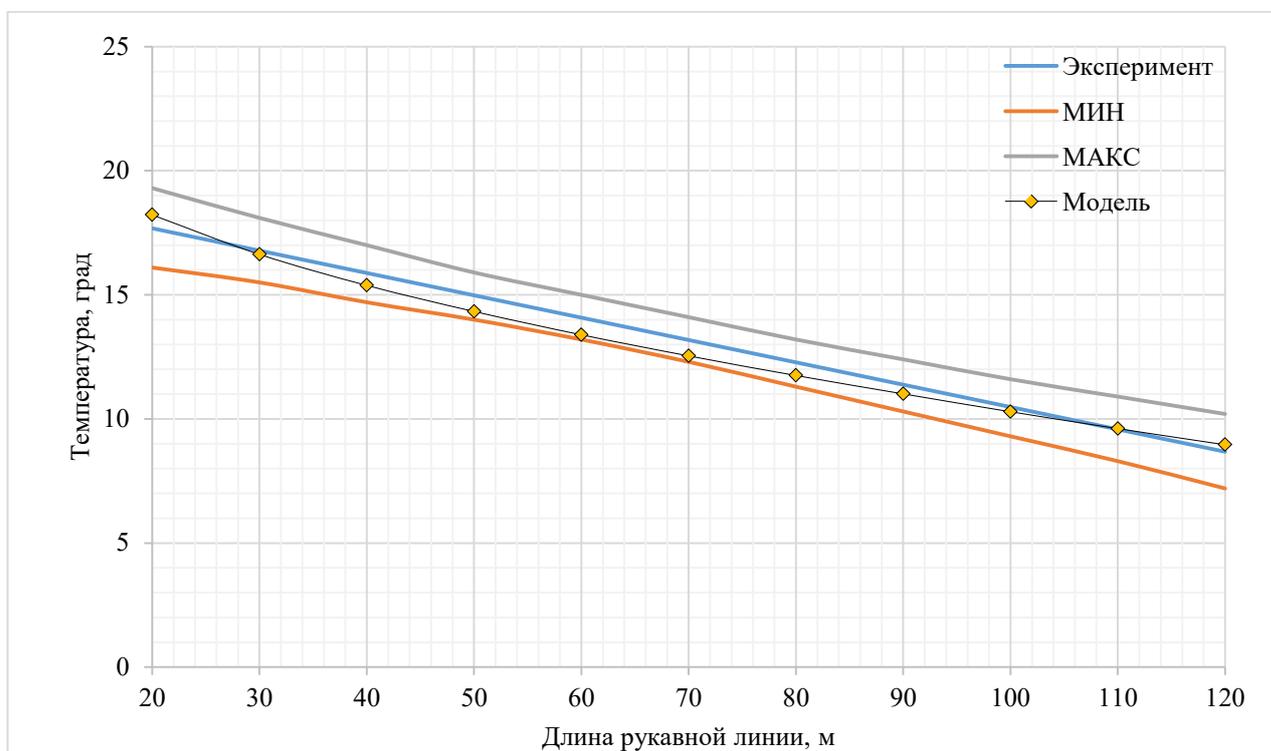


Рисунок 2- Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

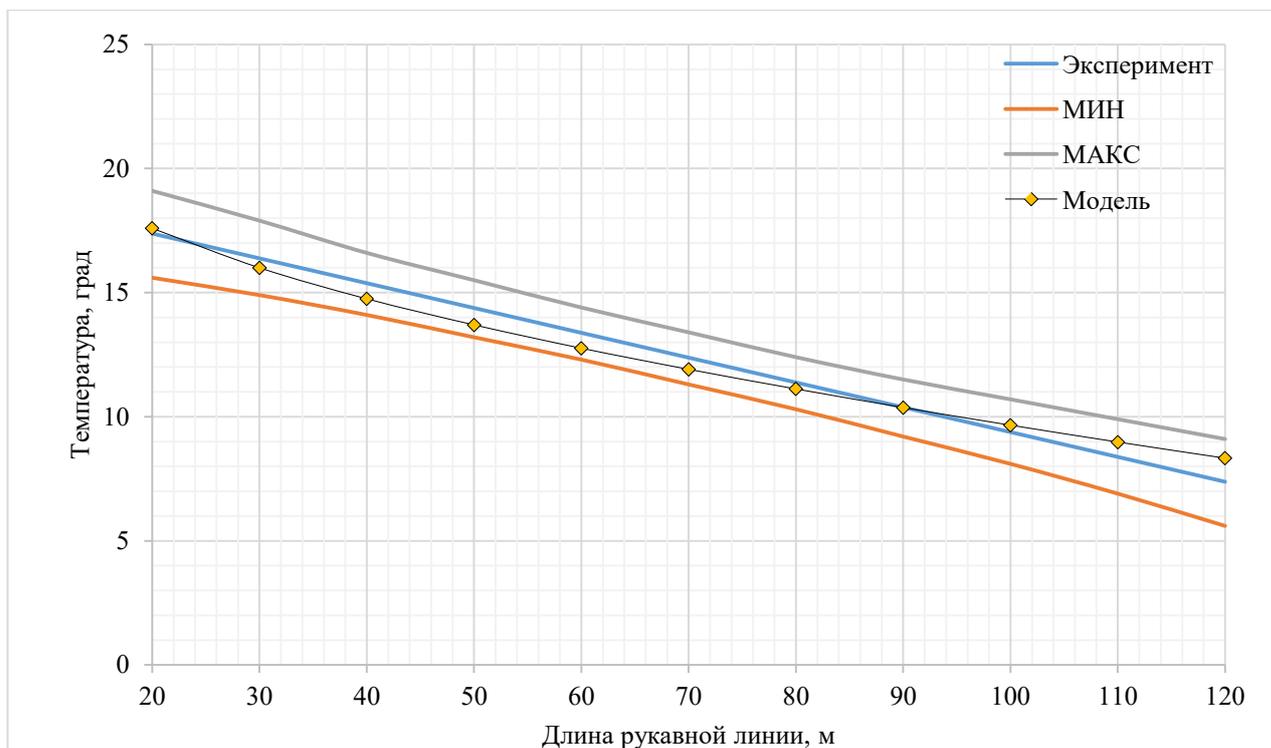


Рисунок 3- Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре -20 °С, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

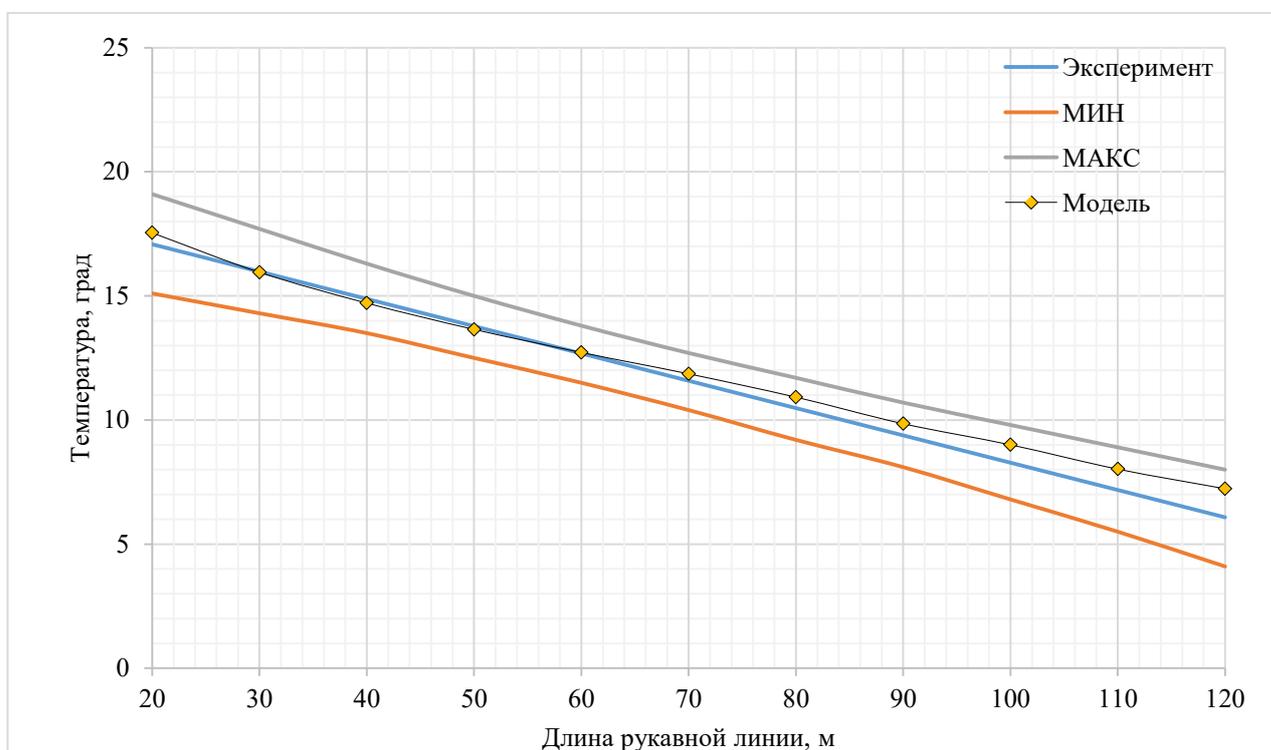


Рисунок 4- Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре -25 °С, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

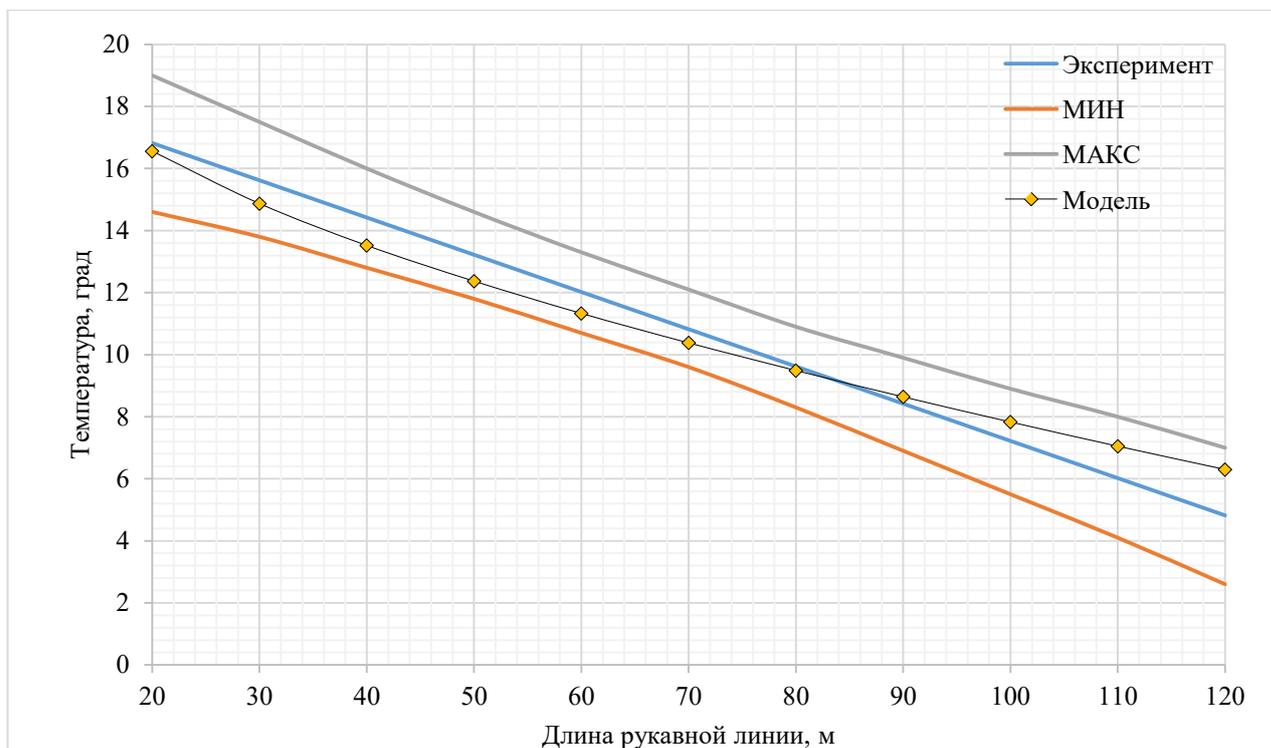


Рисунок 5- Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

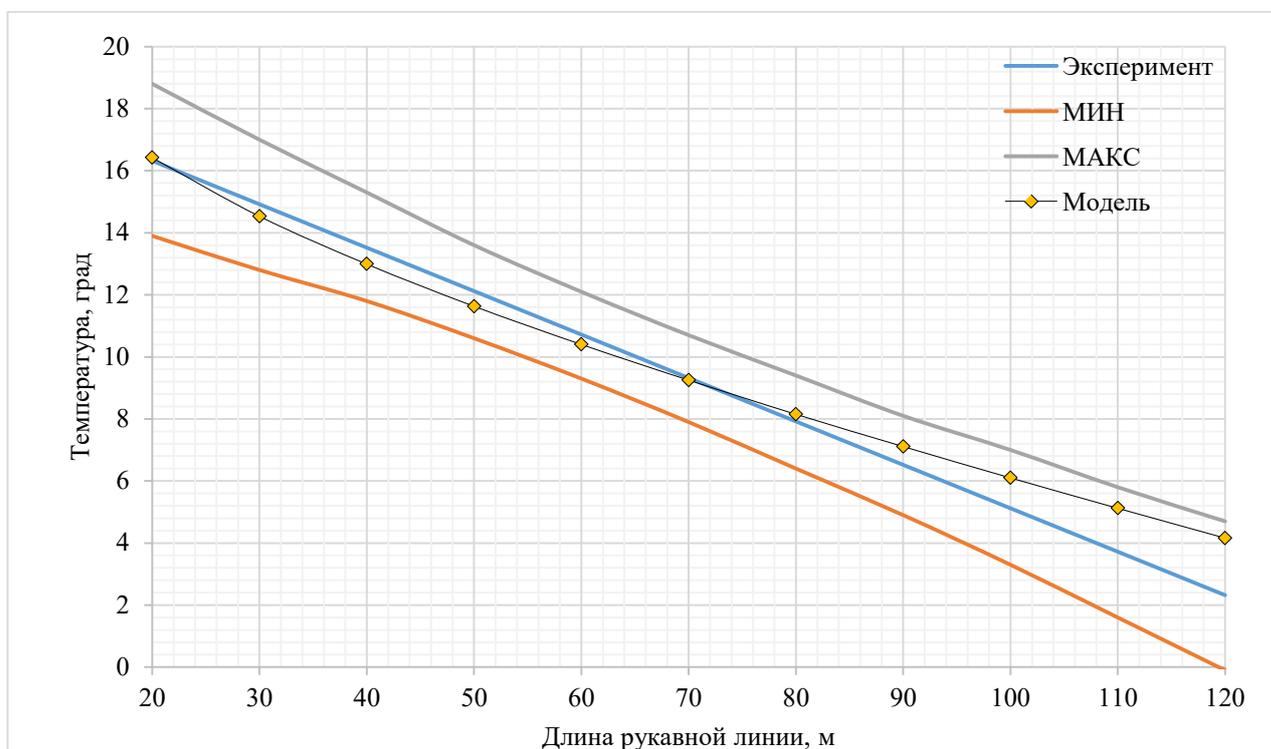


Рисунок 6 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

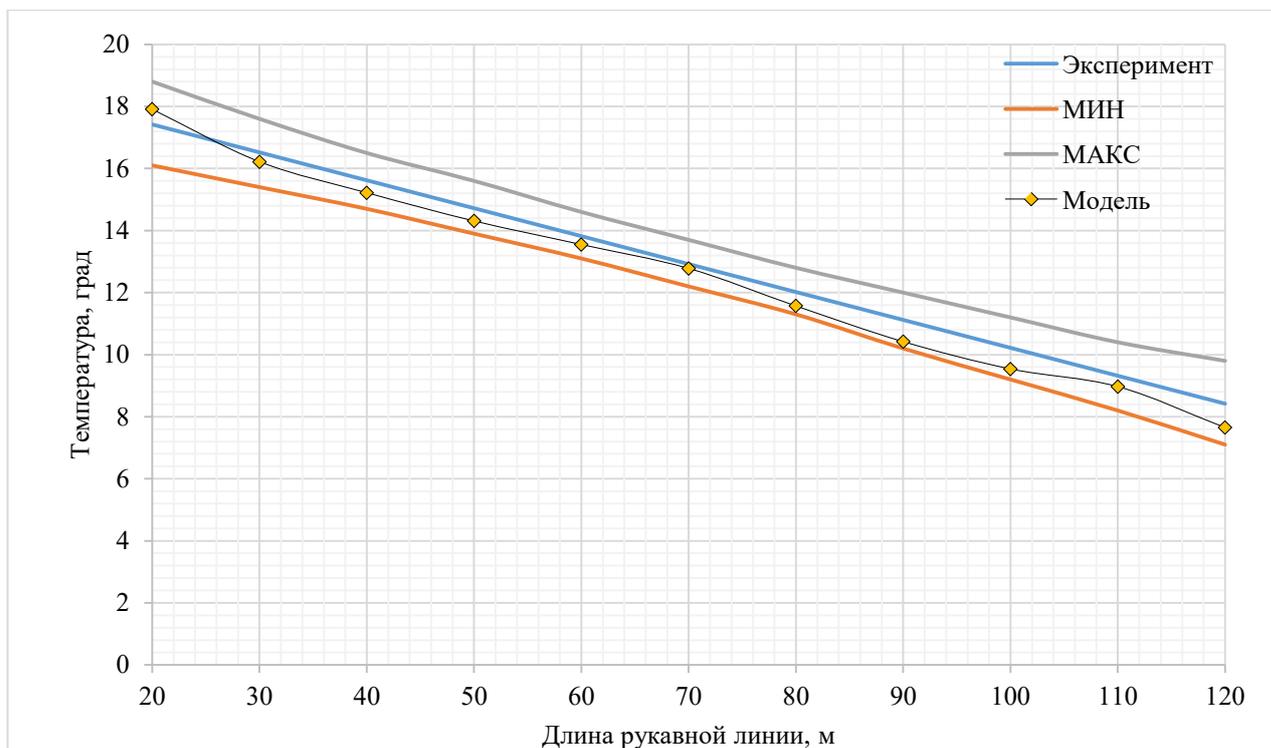


Рисунок 7 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

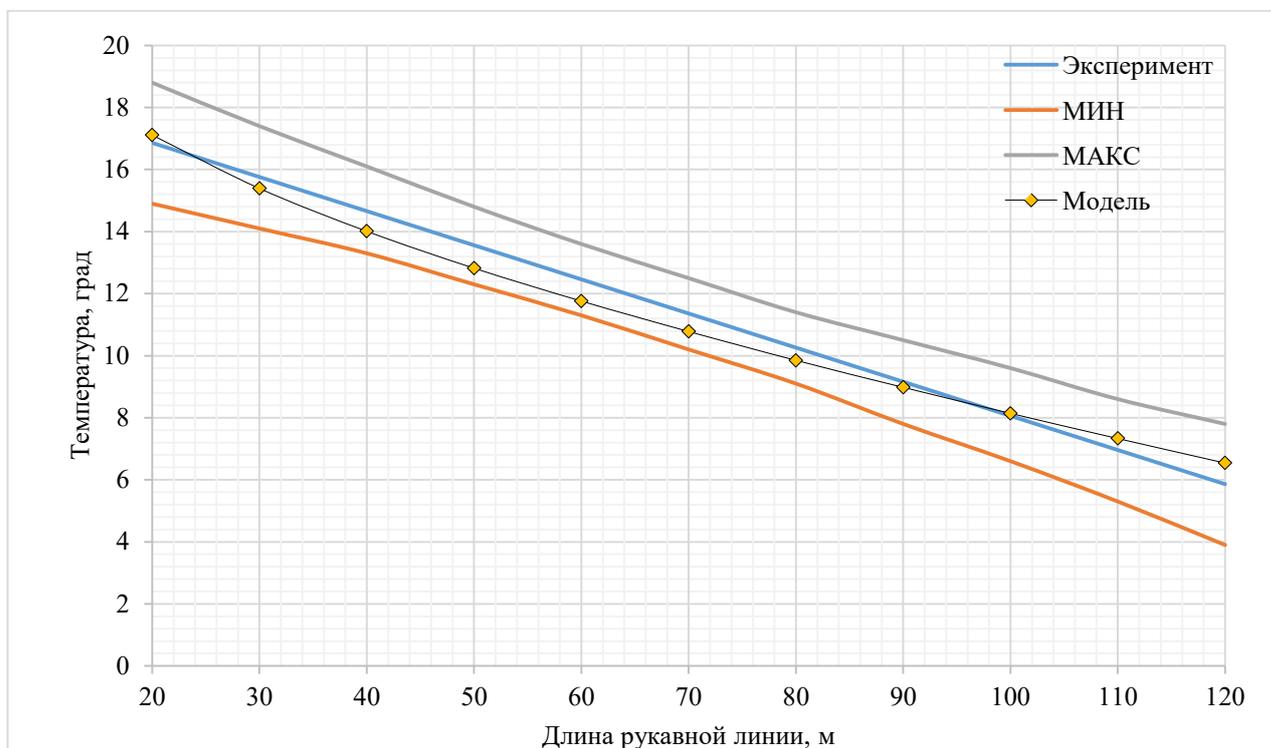


Рисунок 8 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

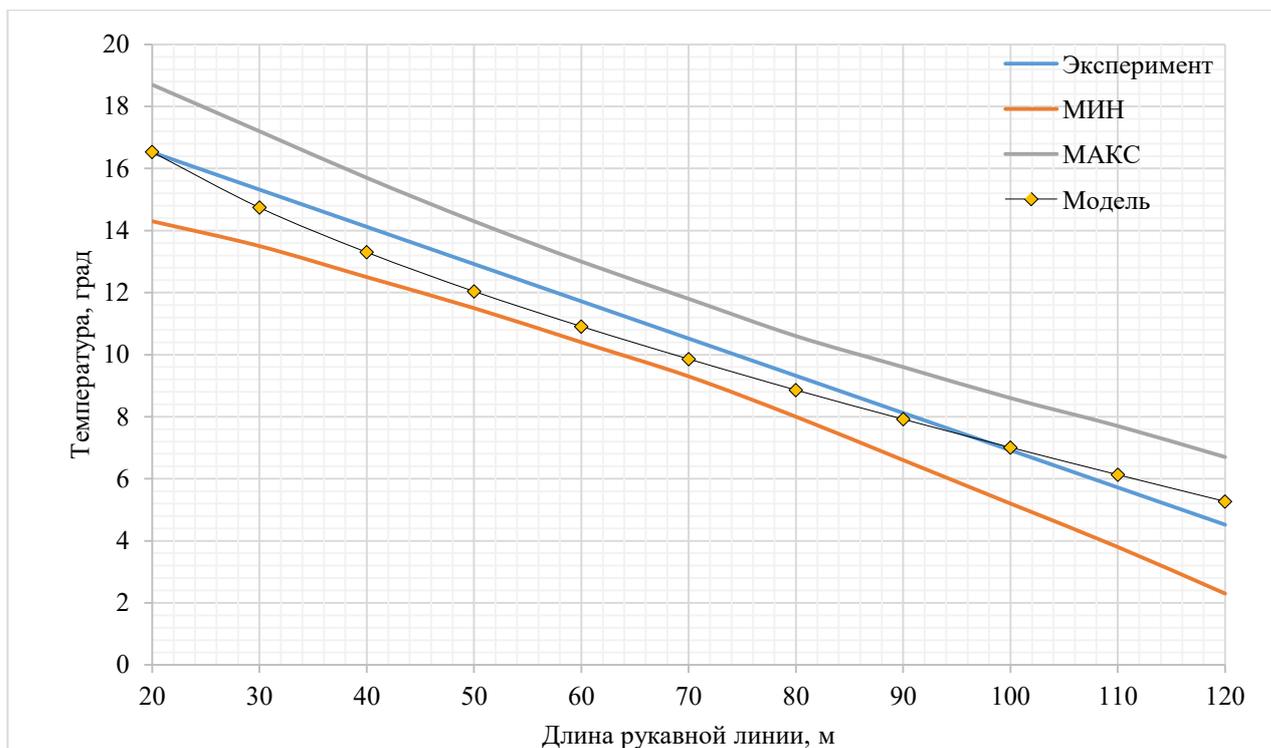


Рисунок 9 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

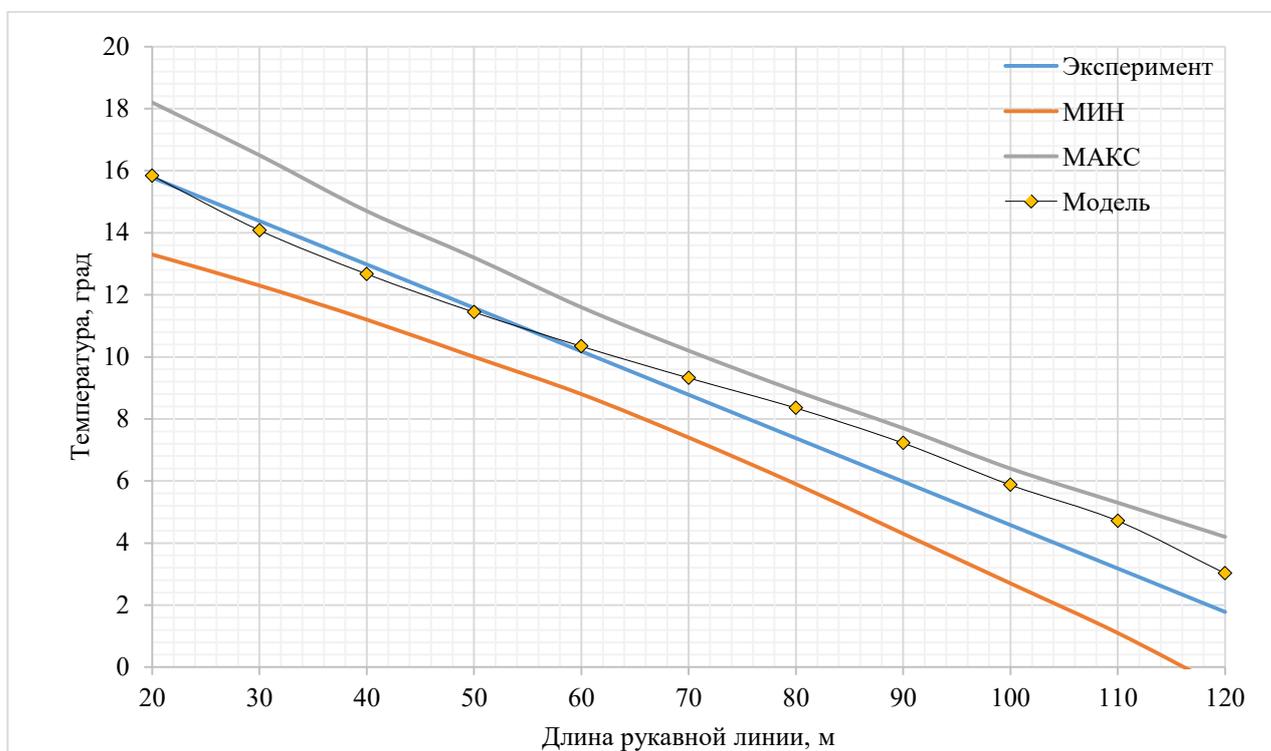


Рисунок 10 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

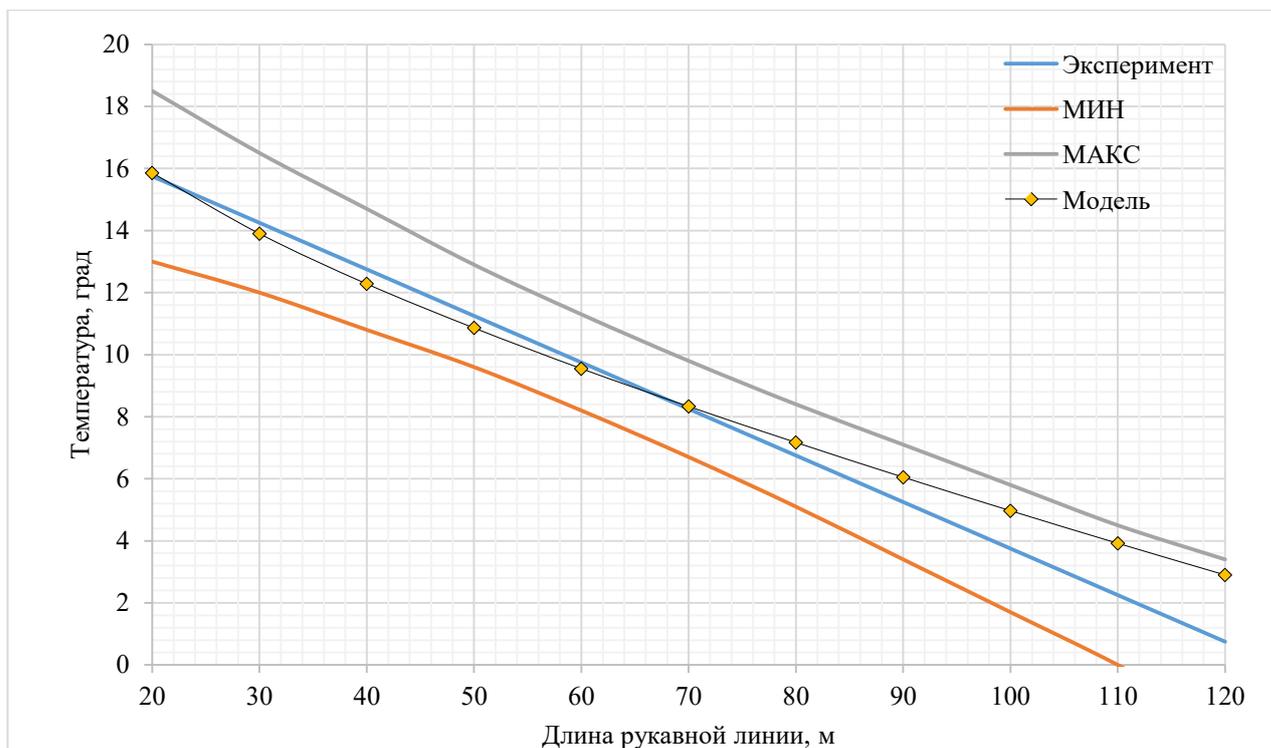


Рисунок 11 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

Рисунок 12 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 10 и скорости ветра 1 м/с

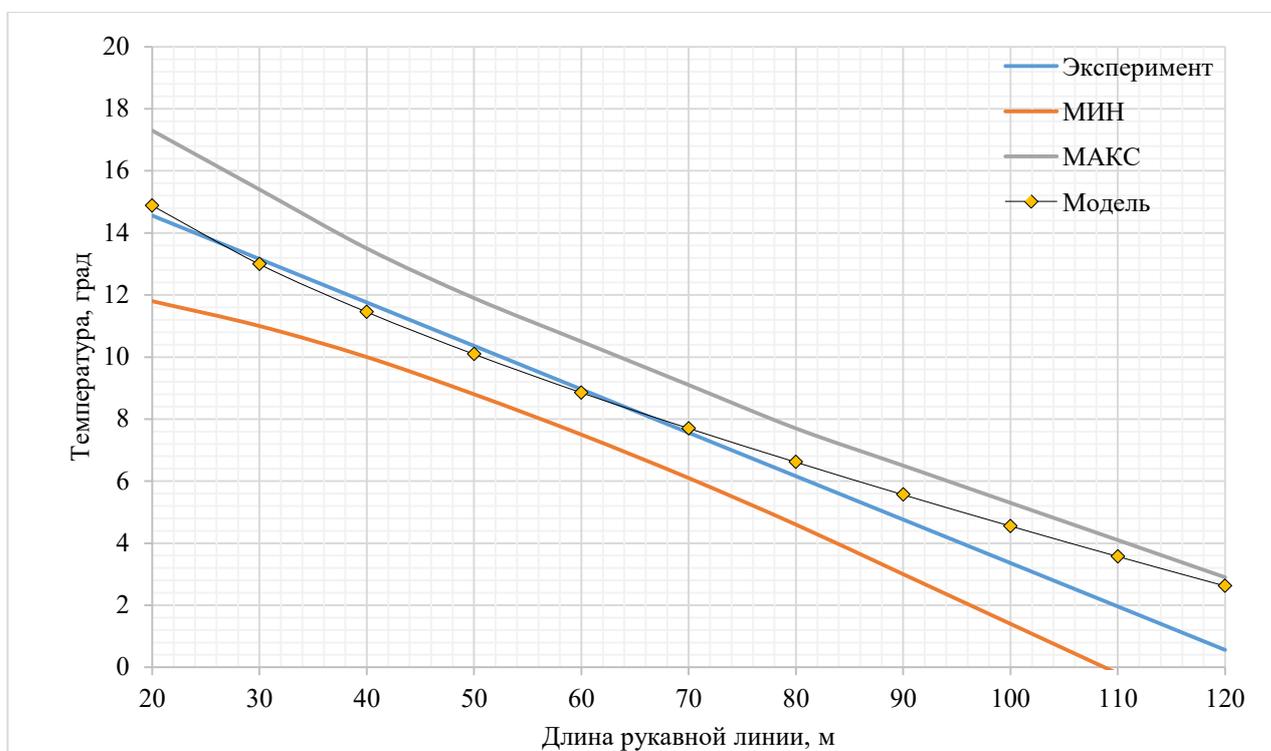


Рисунок 13 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

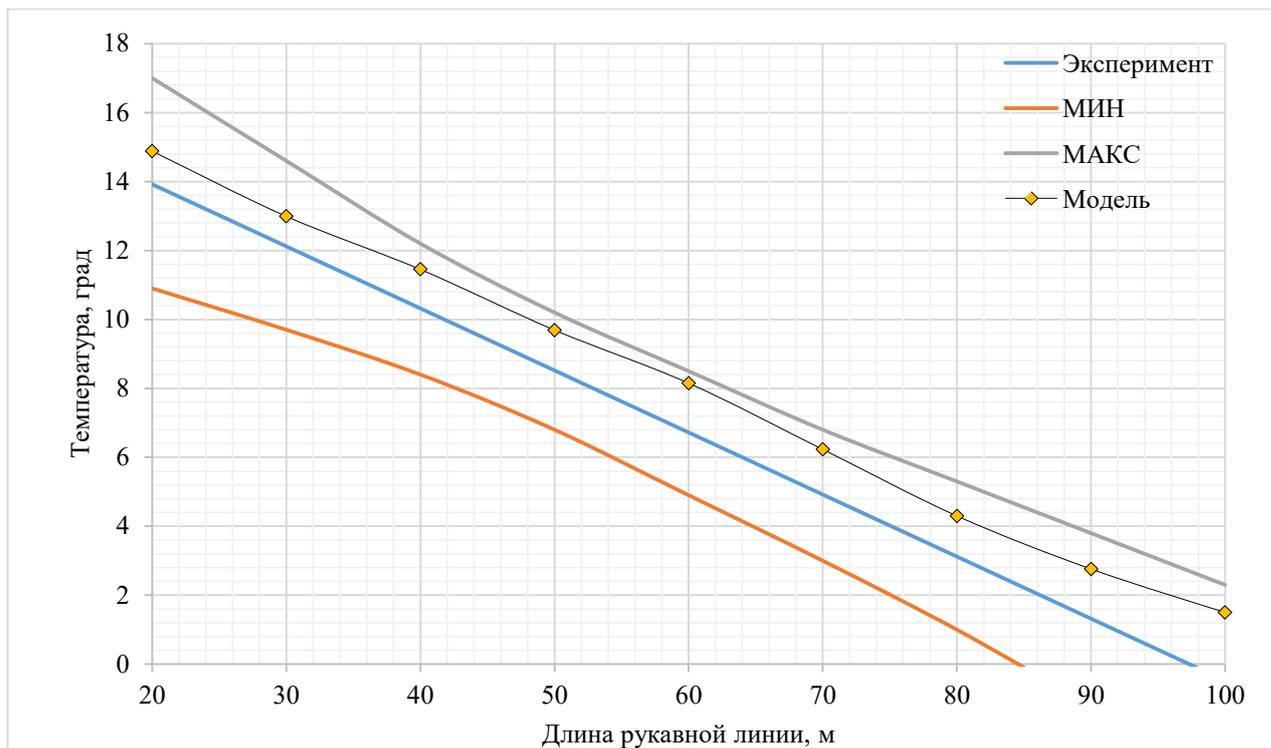


Рисунок 14 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

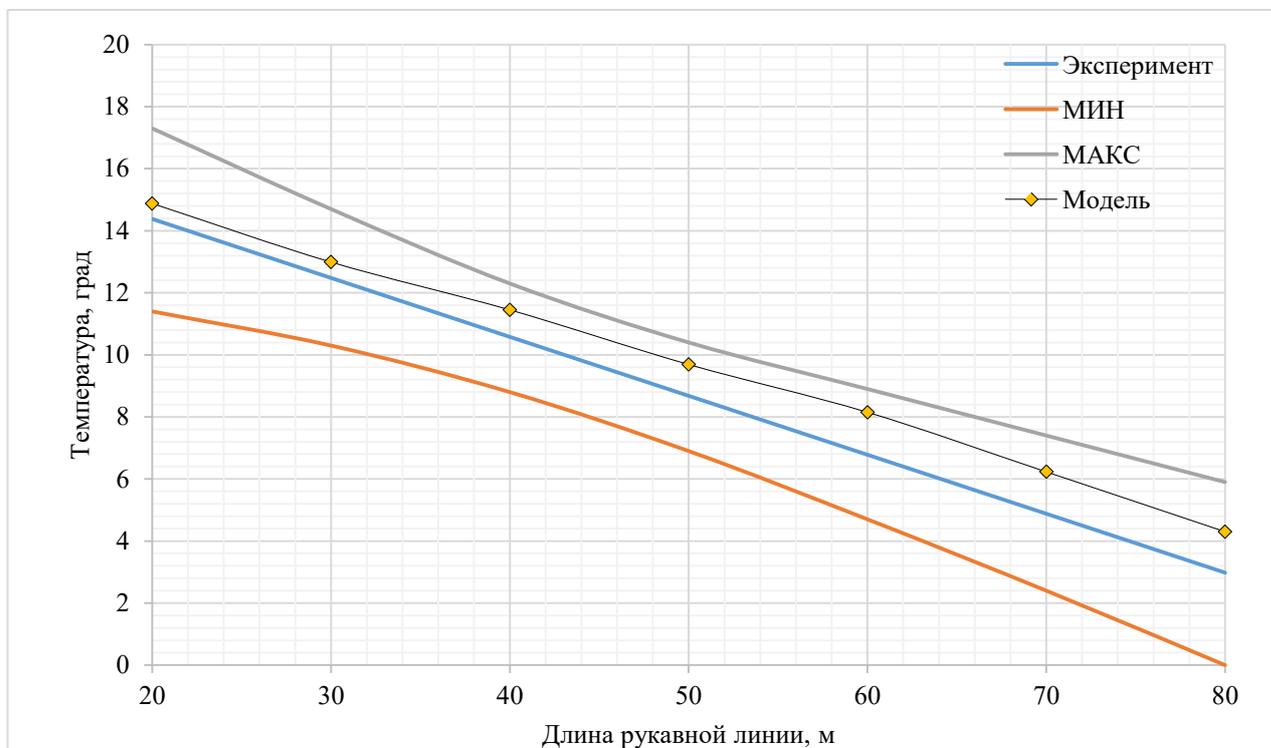


Рисунок 15 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

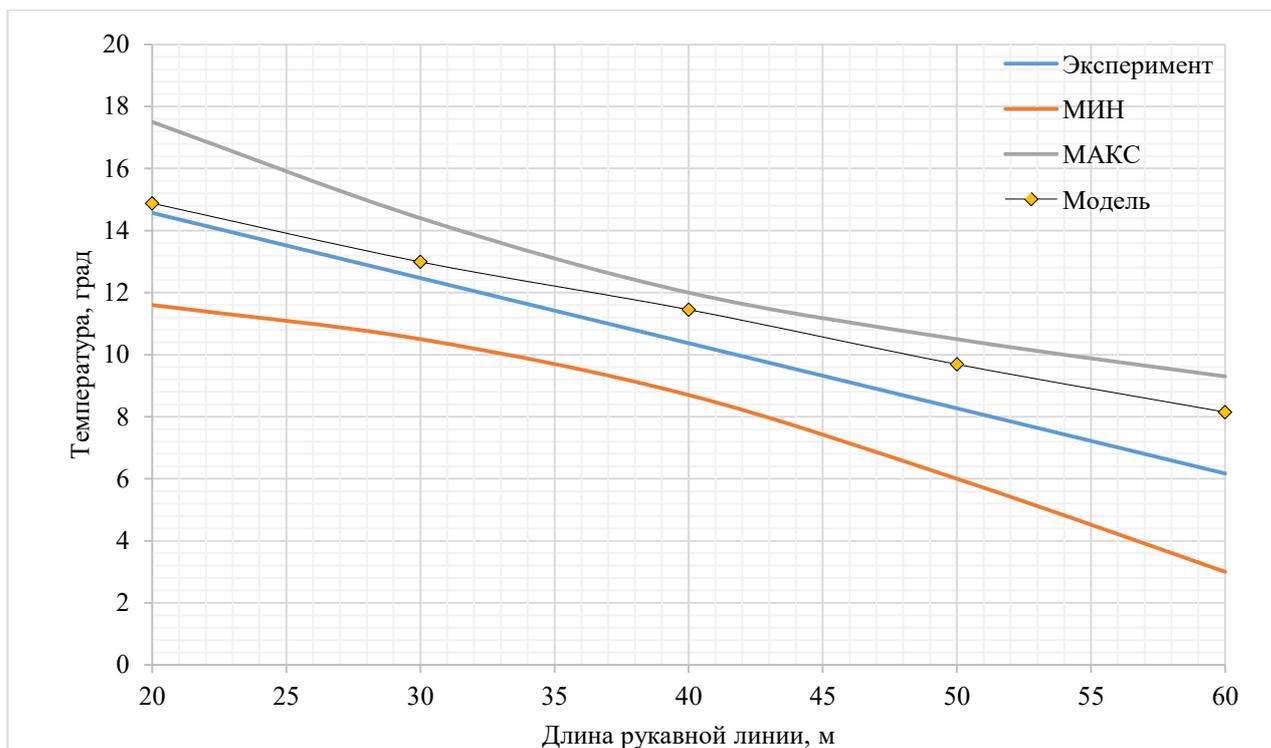


Рисунок 16 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

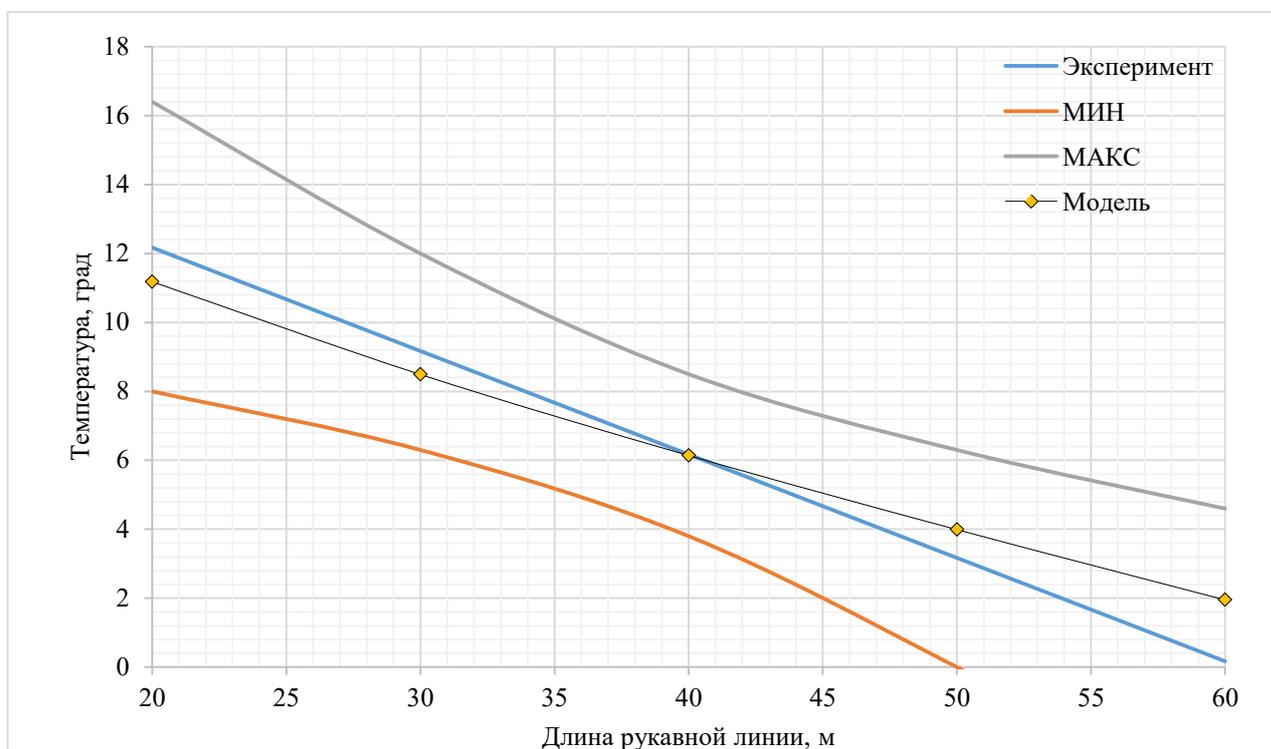


Рисунок 17 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

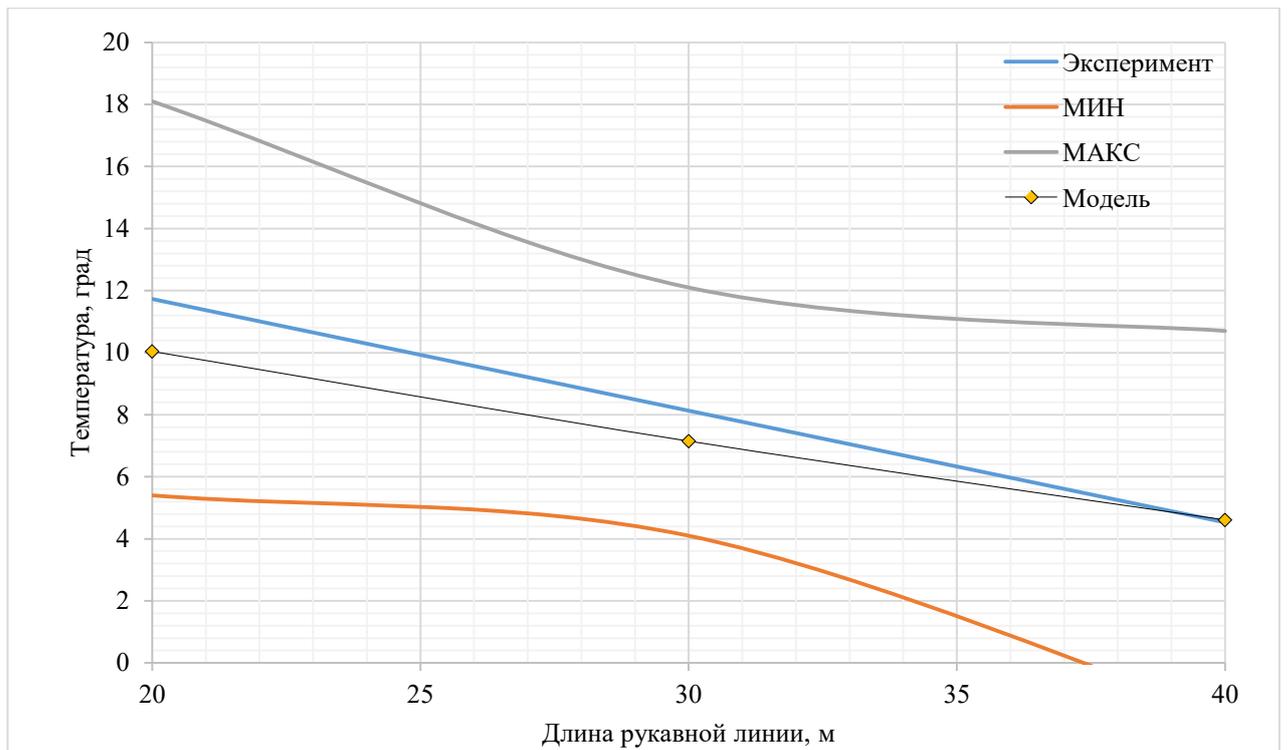


Рисунок 18 - Изменение температуры компрессионной пены в рукавной линии при температуре -35°C , кратности 20 и скорости ветра 1 м/с

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ
КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ ПРИ ПОДАЧЕ ПО НАСОСНО-РУКАВНЫМ
СИСТЕМАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
    Winapi.Windows, Winapi.Messages, System.SysUtils, System.Variants,  
System.Classes, Vcl.Graphics,  
    Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs, Vcl.ExtCtrls, Vcl.StdCtrls;
```

```
type
```

```
    TForm1 = class(TForm)
```

```
        Image1: TImage;
```

```
        LabeledEdit1: TLabeledEdit;
```

```
        LabeledEdit2: TLabeledEdit;
```

```
        LabeledEdit3: TLabeledEdit;
```

```
        LabeledEdit4: TLabeledEdit;
```

```
        Label1: TLabel;
```

```
        Button1: TButton;
```

```
        Label2: TLabel;
```

```
        procedure Button1Click(Sender: TObject);
```

```
    private
```

```
        { Private declarations }
```

```
    public
```

```
        { Public declarations }
```

```
end;
```

```
var
```

```
    Form1: TForm1;
```

```
implementation
```

```

{$R *.dfm}

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
Var
K: integer;
L: integer;
Toc: real;
T0: real;
Int: real;
begin
K:= StrToInt(LabeledEdit1.Text);
L:= StrToInt(LabeledEdit2.Text);
T0:= StrToInt(LabeledEdit3.Text);
Toc:= StrToInt(LabeledEdit4.Text);
if (Toc > 0) or (Toc >=T0) then ShowMessage('Не верно указаны
температуры')
else
Int:=(K*0.1527)+(L*0.0551)+((T0-
Toc)*0.0481)+(Ln(K)*2.4463)+(Ln(L)*2.9370)+(Ln(T0-Toc)*5.1731)-33.8176;
Label2.Caption:=FloatToStrF(Int,ffGeneral,4,2) + ' °C';
end;

end.

```

Приложение Е
(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательской работы в системе МЧС России

1. Наименование полученных результатов научно-исследовательской работы:
Исследование организации и ведения действий по ликвидации аварий на объектах ТЭЦ, расположенных в Арктической зоне РФ.
2. Результат(ы) научно-исследовательской работы:
Результаты проведения опытно-исследовательских задач в Арктической зоне на примере АО «Чукотэнерго» Анадырская ТЭЦ.
3. Заказывающее подразделение: Академия ГПС МЧС России.
4. Исполнитель (соисполнители) работ: УНК ПАСТ.
5. Основание для проведения научно-исследовательской работы: пункт 56 Плана научной работы Академии ГПС МЧС России на 2023 год.
6. Дата и результаты приемки научно-исследовательской работы:
Акт сдачи-приемки результатов научно-исследовательской работы № 56 от «04» 12 2023г., работа принята комиссией на основании: приказа Академии ГПС МЧС России от 17.02.2023 № 95, выписки из протокола заседания научно-технической секции № 1 от «05» 12 2023г.
7. Сведения о внедрении результатов научно-технической деятельности:
Результаты научно-исследовательской работы внедрены в учебный процесс по дисциплине: «Пожарная и аварийно-спасательная техника» раздел IV. «Мобильная средства пожаротушения», а именно:
 - лекция на тему: «Эксплуатация пожарных автомобилей и машин спасательной техники в сложных климатических, дорожных и особых условиях».
8. Сведения об эффективности внедрения полученных результатов научно-исследовательской работы в повседневную деятельность подразделений системы МЧС России:
Полученные результаты позволили повысить качество подготовки обучаемых по теме «Эксплуатация пожарных автомобилей и машин спасательной техники в сложных климатических, дорожных и особых условиях» и сформировать знания особенностей локализации и ликвидации аварийных ситуаций на объектах с энергетики, расположенных в Арктической зоне Российской Федерации. Результаты используются в практической работе сотрудниками Государственной противопожарной службы при тушении пожаров в Арктической зоне РФ при воздействии низких температур с использованием технологии подачи компрессионной пены.
9. Сведения о защите исключительных прав на полученные результаты научно-исследовательской работы:
Права на результаты данной работы принадлежат Российской Федерации

«СОГЛАСОВАНО»

Начальник центра
организации научных исследований
и научной информации
к.т.н., доцент, полковник внутренней службы

С.П. Храмов

«04» 03 2024г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель начальника Академии
по учебной работе
к.и.н., доцент, полковник внутренней службы

В.С. Шныпко

«04» 03 2024г.

АКАДЕМИЯ ГПС МЧС РОССИИ
Ц О Н И И Н И

РЕГ. № 56
04 03 2024г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Главного
управления МЧС России по
Московской области (по ГПС)
полковник внутренней службы
В.Е. Беловошин
«29» сентября 2020 г.

АКТ

внедрения результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы адъюнкта факультета научно-педагогических кадров
Академии ГПС МЧС России, лейтенанта внутренней службы
Гумирова Андрея Сергеевича

Комиссия в составе:

- начальник управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ полковника внутренней службы Логинова Алексея Борисовича;
- заместитель начальника управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Московской области полковника внутренней службы Киселева Дмитрия Владимировича;
- заместитель начальника отдела организации пожаротушения управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Московской области подполковника внутренней службы Бек Алексея Викторовича, составила настоящий акт о том, что при определении параметров массового расхода компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам использовалась программа и методика, разработанная Гумировым А.С. По результатам экспериментального исследования, проведенного в 17 специализированной пожарно-спасательной части 18 пожарно-спасательного отряда ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Московской области подготовлен отчет о параметрах массового расхода при применении установок подачи компрессионной пены «САФС» в зависимости от кратности. С помощью разработанной программы и методики эксперимента могут быть определены массовые расходы двухканальной пневматической пеногенерирующей установки получения и подачи пеновоздушной смеси, что дает возможность планирования сил и средств при тушении пожаров.

Начальник УОПТ и ПАСР Главного управления
МЧС России по Московской области
полковник внутренней службы


Логинов А.Б.

Заместитель начальника УОПТ и ПАСР Главного управления
МЧС России по Московской области
полковник внутренней службы


Киселев Д.В.

Заместитель начальника ООПТ УОПТ и ПАСР
Главного управления МЧС России
по Московской области
подполковник внутренней службы


Бек А.В.

УТВЕРЖДАЮ
 Первый заместитель начальника
 Главного управления МЧС России
 по Чукотскому автономному округу
 полковник


 А.А. Панов
 15/ июня 2021 г.

АКТ

на внедрение результатов экспериментальных исследований, полученных при
 выполнении диссертационной работы специалиста
 Гумирова Андрея Сергеевича

Комиссия в составе:

- начальника ПСО ФПС ГПС ГУ МЧС России по Чукотскому автономному округу капитана внутренней службы Чепурнова Дениса Олеговича;
- начальника 5 ПСЧ ПСО ФПС ГПС ГУ МЧС России по Чукотскому автономному округу майора внутренней службы Хмелинина Александра Сергеевича;
- старшего инженера отдела организации пожаротушения, подготовки и проведения аварийно-спасательных работ ГУ МЧС России по Чукотскому автономному округу старшего лейтенанта внутренней службы Зяблицева Никиты Владимировича,

составила настоящий акт о том, что при проведении межведомственного опытно-исследовательского учения по выполнению мероприятий по защите территорий, входящих в Арктическую зону Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций использовалась программа и методика проведения экспериментальных исследований по определению параметров компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам, разработанная Гумировым А.С. в рамках выполнения диссертационной работы.

Начальник ПСО
 ФПС ГПС ГУ МЧС России
 по Чукотскому автономному округу
 капитан внутренней службы



Д.О. Чепурнов

Начальник 5 ПСЧ ПСО
 ФПС ГПС ГУ МЧС России
 по Чукотскому автономному округу
 майор внутренней службы



А.С. Хмелинин

Старший инженер ООП, П и ПАСР
 ГУ МЧС России
 по Чукотскому автономному округу
 старший лейтенант внутренней службы



Н.В. Зяблицев

УТВЕРЖДАЮ
 Начальник специального отдела № 21
 ФГКУ «Специальное управление ФПС № 3 МЧС России»
 полковник внутренней службы
 А.Н. Козлов
 03 марта 2021 г.

АКТ

на внедрение результатов экспериментальных исследований, полученных при выполнении
 диссертационной работы специалиста
 Гумирова Андрея Сергеевича

Комиссия в составе:

- лейтенант внутренней службы А.С. Гумиров, адъютант ФПНПК;
- подполковник внутренней службы А.В. Шкатулов, начальник специальной пожарно-спасательной части № 32;
- майор внутренней службы П.Н. Бляблин, заместитель начальника специальной пожарно-спасательной части № 32;
- прапорщик внутренней службы Е.Ю. Ровнягин, старший мастер ГДЗС группы обеспечения специальной пожарно-спасательной части № 32;

составила настоящий акт о том, что при определении параметров интенсивности охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам использовалась программа и методика проведения экспериментальных исследований, разработанная Гумировым А.С. в своей диссертационной работе.

Для исследования параметров интенсивности охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур использовался измерительный комплекс, с помощью которого фиксировались параметры движения компрессионной пены при отрицательных температурах.

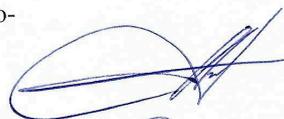
При обработке экспериментальных данных были получены зависимости параметров интенсивности охлаждения от кратности и массового расхода компрессионной пены.

Начальник специальной пожарно-спасательной части № 32
 подполковник внутренней службы



А.В. Шкатулов

Заместитель начальника специальной пожарно-спасательной части № 32
 майор внутренней службы



П.Н. Бляблин

Старший мастер ГДЗС группы обеспечения специальной пожарно-спасательной части № 32
 прапорщик внутренней службы



Е.Ю. Ровнягин

Адъютант ФПНПК
 лейтенант внутренней службы



А.С. Гумиров

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
АО "Пожгидравлика"

А.М. Бурдин

2022 г.



АКТ

**внедрения результатов научных исследований,
полученных при выполнении диссертационной работы
инженера Гумирова Андрея Сергеевича**

07 апреля 2022 г.

Комиссия специалистов АО "Пожгидравлика" в составе:

- технического директора Бурдина А.М.;
- заместителя генерального директора по качеству и сервису Еникеева А.М.;
- главного конструктора Гайнанова В.Ф.;
- ведущего конструктора Колесникова А.В.

составила настоящий акт о том, что материалы экспериментальных исследований по изучению процессов охлаждения компрессионной пены при подаче её по рукавным линиям, которые были получены инженером Гумириным А.С. в своей диссертационной работе, признаны полезными и рекомендованы к практическому использованию в работах АО "Пожгидравлика" по соответствующей тематике.

При помощи специального измерительного комплекса и соответствующей программы-методики натурных экспериментов автором работы были получены эмпирические зависимости, определяющие скорость охлаждения компрессионной пены различной кратности и интенсивности подачи применительно к рукавным линиям, составленным из льняных напорных рукавов.

Указанные эмпирические зависимости нашли применение при анализе работы пенных систем CAFS в условиях низких температур и назначении оптимальных режимов подачи пены и оптимальных характеристик рукавных линий в ходе практического применения данных систем, а также при проведении различных контрольных испытаний с реальной генерацией компрессионной пены.

Зам. генерального директора
по качеству и сервису

А.М. Еникеев

Главный конструктор

В.Ф. Гайнанов

Ведущий конструктор

А.В. Колесников

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе

кандидат исторических наук, доцент

В.С. Шныпко

02 _____ 2022 г.



внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта очного обучения кафедры пожарной техники в составе УНК ПАСТ Академии ГПС МЧС России старшего лейтенанта внутренней службы Гумирова Андрея Сергеевича

Комиссия в составе:

- начальника УНК ПАСТ, к.т.н., доцента, полковника внутренней службы Климовцова Василия Михайловича;
- доцента кафедры пожарной техники в составе УНК ПАСТ, к.т.н., Двоенко Олега Викторовича;
- доцента кафедры пожарной техники в составе УНК ПАСТ, к.т.н., Ольховского Ивана Александровича;

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Гумирова А.С. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» внедрены для проведения практических и лабораторных работ по дисциплине «Пожарная и аварийно-спасательная техника» для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Начальник УНК ПАСТ
к.т.н., доцент
полковник внутренней службы

В.М. Климовцов

Доцент кафедры пожарной техники
в составе УНК ПАСТ
к.т.н.,
майор внутренней службы

О.В. Двоенко

Доцент кафедры пожарной техники
в составе УНК ПАСТ
к.т.н.,
майор внутренней службы

И.А. Ольховский

Приложение Ж
(обязательное)

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680146

**«Расчет температуры охлаждения компрессионной пены
при подаче по насосно-рукавным системам»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (RU)*

Авторы: *Гумиров Андрей Сергеевич (RU), Шульпинов Андрей Алексеевич (RU), Федяев Владислав Дмитриевич (RU), Стругов Александр Олегович (RU), Двоенко Олег Викторович (RU), Алешков Михаил Владимирович (RU)*

Заявка № 2022669532

Дата поступления 20 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 октября 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024669118

«Программа считывания данных с измерительного
комплекса»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (RU)*

Авторы: *Гумиров Андрей Сергеевич (RU), Двоенко Олег Викторович (RU), Шутьпинов Андрей Алексеевич (RU), Бякова Ирина Александровна (RU), Гумирова Маргарита Сергеевна (RU), Алешков Михаил Владимирович (RU), Федяев Владислав Дмитриевич (RU), Стругов Александр Олегович (RU)*

Заявка № 2024667600

Дата поступления 30 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 августа 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1a6300b154f240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

