

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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре пожарной техники в составе учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Алешков Михаил Владимирович**

Официальные оппоненты: **Барбин Николай Михайлович**  
доктор технических наук, доцент  
Уральский институт ГПС МЧС России,  
научно-исследовательское отделение  
учебно-научного комплекса  
пожаротушения и проведения  
аварийно-спасательных работ,  
ведущий научный сотрудник

**Федоткин Дмитрий Вячеславович**  
доктор технических наук,  
Университет науки и технологий  
«МИСИС»,  
кафедра техносферной безопасности,  
профессор

Ведущая организация: Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет

Защита диссертации состоится «19» декабря 2025 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/04a/y774js3di4irbpbk3umiwpdt6797kj6k/Диссертация%20Гумирова%20А.С..pdf>

Автореферат разослан «08» октября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Соковнин Артем Игоревич

## 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.

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.

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.

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 том числе и 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.

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.).

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.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, определены объект и предмет исследования, поставлена цель и задачи диссертационной работы, представлены сведения о научных результатах и практической значимости исследования.

**В первой главе «Размещение объектов энергетики на территории Российской Федерации и особенности тушения пожаров на этих объектах»** представлены результаты проведенного статистического анализа по пожарам и авариям, произошедшим на объектах энергетики за период с 2014 по 2023 гг.

Проведен анализ расположения объектов энергетики на территории Российской Федерации в зависимости от различных климатических районов.

Территорию страны принято делить на три климатические зоны: северную, зону умеренного климата и южную. Эти зоны, в свою очередь, делятся на природно-климатические пояса (районы), которые классифицируются как очень холодный, холодный, умеренно холодный, умеренный и умеренно теплый влажный. Согласно ГОСТ 16350-80 холодные климатические районы занимают более 85 % всей территории России (рисунок 1)

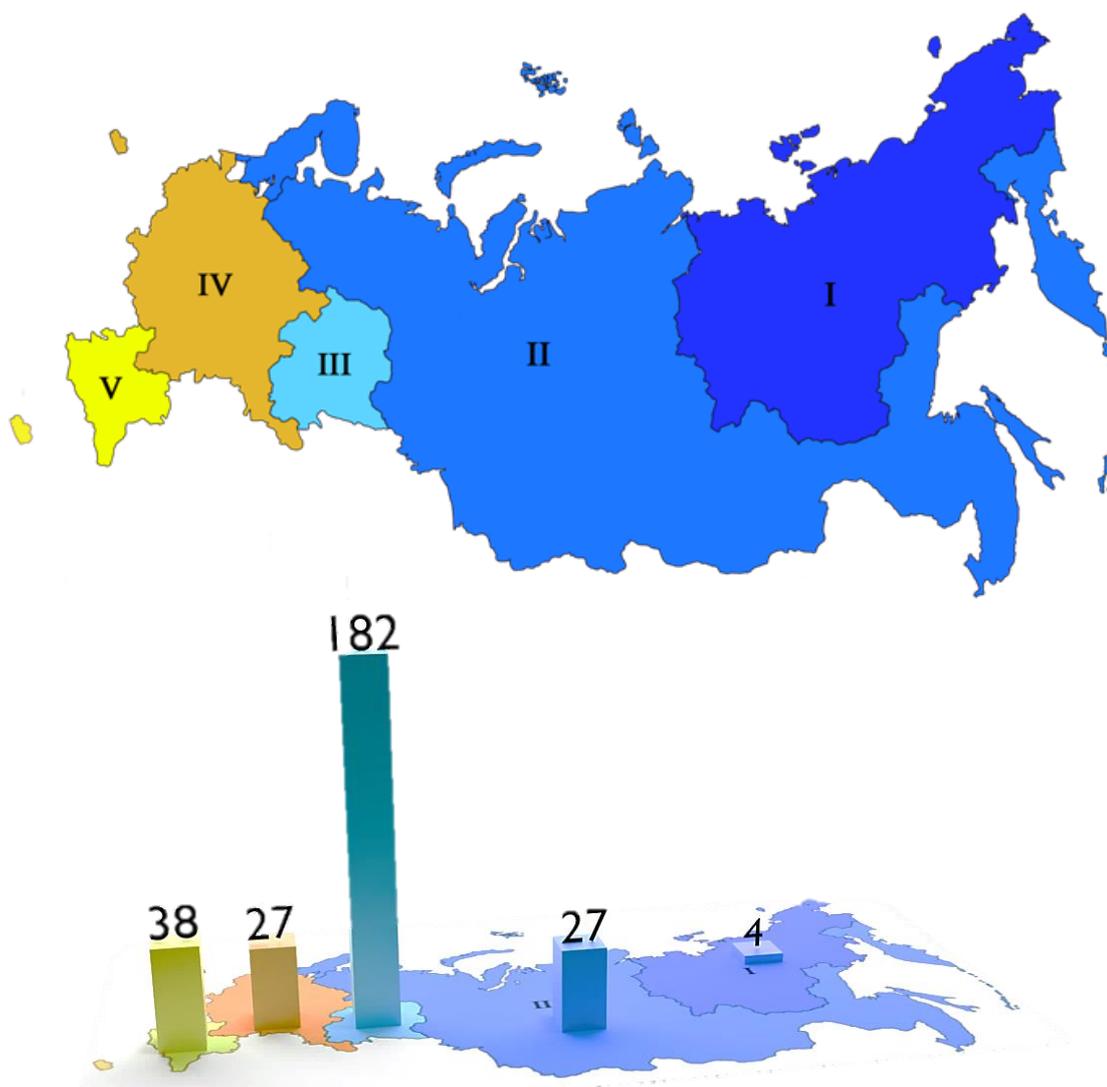


Рисунок 1. Климатические районы России:  
 I – очень холодный; II – холодный; III – умеренно холодный;  
 IV – умеренный; V – умеренно теплый, влажный

Значительное количество объектов энергетики расположено на территории холодных климатических районов (Таблица 1). Анализ распределения объектов энергетики на территории различных климатических районов показал, что более 75 % крупных объектов энергетики расположены в районах с холодным климатом.

Таблица 1 – Размещение крупных объектов энергетики в климатических районах Российской Федерации

Климатический район	Очень холодный	Холодный	Умеренно холодный	Умеренный	Умеренно теплый
Количество крупных объектов энергетики, ед.	4	27	182	27	38

Такое территориальное размещение объектов энергетики повышает риски возникновения и развития на них чрезвычайной ситуации и пожаров. Одним из основных факторов, представляющих опасность на этих территориях, является низкая температура. При одновременном сочетании опасных климатических факторов и пожара на объектах энергетики возможно возникновение сложной ситуации, которая может сопровождаться тяжелыми последствиями и, соответственно, значительным материальным ущербом.

Был проведен анализ распределения числа пожаров на объектах энергетики, а также анализ распределения количества пожаров в зависимости от периода года на этих объектах (Таблица 2, Рисунок 2).

Таблица 2 – Распределение пожаров на объектах энергетики по климатическим районам за период с 2014 по 2023 гг.

Климатический район	Количество пожаров	Процентное содержание 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

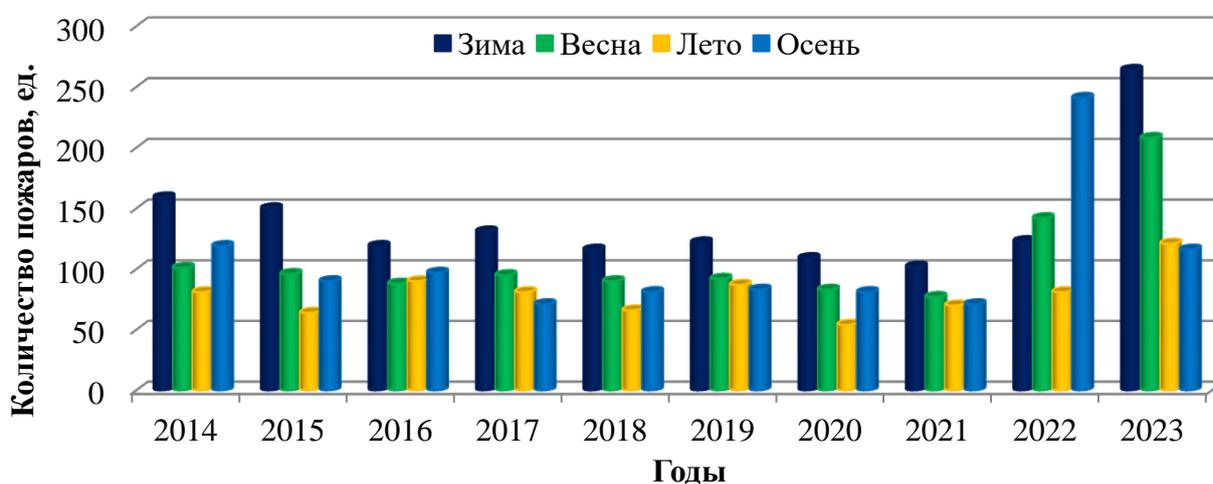


Рисунок 2 – Распределение пожаров на объектах энергетики по времени года за период с 2014 по 2023 гг.

Установлено, что более 50 % пожаров произошло в холодных климатических районах.

Также, исходя из проведенного анализа видно, что количество пожаров на объектах энергетики в зимний период года больше, чем в любой другой

период года, что подтверждает влияние низких температур окружающего воздуха на развитие пожаров.

Результаты анализа территориального размещения объектов энергетики, а также статистические данные о пожарах на данных объектах позволяют сделать вывод о том, что наибольшее количество пожаров происходит на объектах, расположенных в холодных климатических районах, а также в зимний период времени.

Пожары, происходящие на объектах энергетики, являются наиболее сложными. Сложность тушения таких пожаров заключается в большом количестве горючего материала, расположенном на незначительной площади.

Эффективная ликвидация таких пожаров требует применения современных средств тушения, каким в настоящее время является компрессионная пена.

**Во второй главе «Теоретические и экспериментальные исследования процесса охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур»** рассмотрены конструктивные и технические особенности пеногенерирующих установок подачи компрессионной пены различных типов.

Технология подачи компрессионной пены позволяет получать пену путем смешения раствора пенообразователя и сжатого воздуха под давлением и подавать непосредственно из ствола не раствор воды и пенообразователя, а готовую для тушения пену.

Компрессионная пена, используемая для тушения пожаров, имеет те же свойства, что и пена, полученная традиционным вспениванием, однако у нее есть ряд таких преимуществ, как:

- высокая дальность подачи (до 25 м при давлении 7 атм.);
- низкий расход огнетушащего вещества 1,5–2 л/с;
- отсутствие жидкой фазы (весь раствор переходит в пену);
- равномерное структурированное строение с равным размером пузырьков (1,5–2 мм), с более толстой стенкой пузырька, что увеличивает время его существования (рисунок 3);
- высокая адгезионная способность, обусловленная низким содержанием воды в пене;
- возможность подачи на высоту до 200 м в вертикальной прокладке.

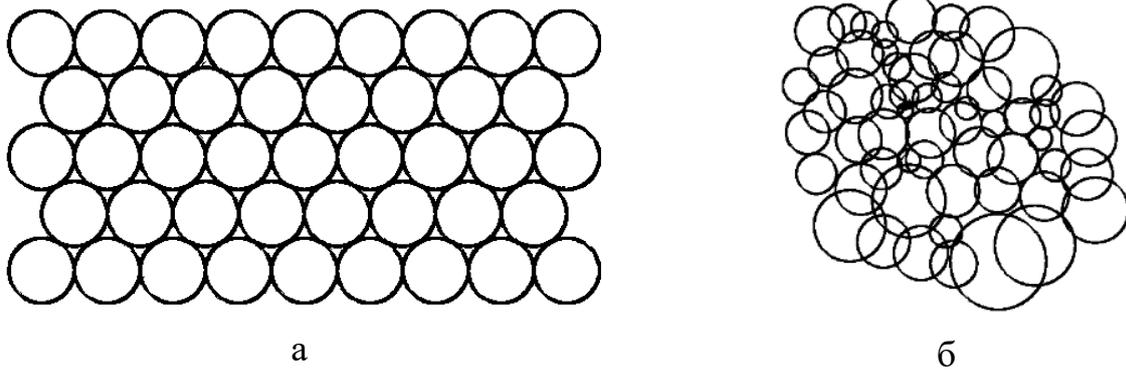


Рисунок 3 – Структура пены:

а – компрессионная пена; б – традиционная воздушно-механическая пена

На территории Российской Федерации для тушения пожаров применяются установки получения и подачи компрессионной пены двух типов: баллонного и компрессорного типа. В работе были рассмотрены установки обоих типов, определены их достоинства и недостатки. В ходе проведения экспериментальных исследований так же использовались установки обоих типов. Наиболее стабильную работу показали установки компрессорного типа. Это связано с тем, что данные установки могли обеспечить непрерывную подачу компрессионной пены без снижения ее качества, так как подача воздуха была постоянной и стабильной.

При проведении исследований была решена задача по разработке специального измерительного комплекса, программы и методики проведения экспериментальных исследований процесса охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур окружающей среды, а также проведены теоретические исследования охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур и выбрана математическая модель для описания процесса. Данная модель охлаждения компрессионной пены по насосно-рукавным системам позволяет:

- определить критические расстояния по фактору охлаждения при подаче компрессионной пены по насосно-рукавным системам;
- определить конечную температуру пеновоздушной смеси при подаче по пожарным рукавам;
- определить зависимость охлаждения компрессионной пены от режима работы установки при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур. Под режимом работы понимаются параметры кратности, массового расхода и начальной температуры компрессионной пены.

Для определения изменения температуры по длине насосно-рукавных систем в условиях низких температур предложена следующая зависимость:

$$\rho_{\text{кп}} C_{\text{кп}} U_{\text{ср}} \frac{dT}{dx} = \frac{K}{R} (T_{\text{ос}} - T_{\text{н}}), \quad (1)$$

В данной математической модели используется следующее начальное условие:

$$T_{x=0} = T_{\text{н}}. \quad (2)$$

В начальной точке и в начальный момент времени начальная температура равна  $T_{\text{н}}$ .

Решение основного уравнения (1) математической модели охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам с начальными условиями можно записать в виде:

$$T(x) = T_{\text{ос}} + (T_{\text{н}} - T_{\text{ос}}) \exp\left(-\frac{2K}{\rho_{\text{кп}} \cdot C_{\text{кп}} \cdot U_{\text{ср}} \cdot R} \cdot X\right) \quad (3)$$

где  $C_{\text{кп}}$  – значение теплоемкости компрессионной пены, Дж/(кг·°C);  $U_{\text{ср}}$  – средняя скорость компрессионной пены в рукаве, м/с;  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающего воздуха, °C;  $T_{\text{н}}$  – температура компрессионной пены при входе в рукавную линию, °C;  $X$  – длина исследуемого участка пожарного рукава, м;  $R$  – внутренний радиус рукава, м;  $K$  – коэффициент теплопередачи от внешней среды до пены при течении в рукаве;  $\rho_{\text{кп}}$  – плотность компрессионной пены, кг/м<sup>3</sup>;

$$\frac{1}{K} = \frac{\delta}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина стенки исследуемого рукава, м;  $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности материала рукава, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от потока пены к поверхности пожарного рукава, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности пожарного рукава к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·град).

Для определения плотности компрессионной пены предлагается использовать следующую зависимость:

$$\rho_{\text{кп}} = \rho_{\text{вод}} \beta_{\text{вод}} + \beta_{\text{возд}} \rho_{\text{возд}}, \quad (5)$$

где  $\beta_{\text{вод}}$  – массовая доля воды в компрессионной пене;  $\beta_{\text{возд}}$  – массовая доля воздуха в компрессионной пене;  $\rho_{\text{вод}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{возд}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>. В данной формуле плотность компрессионной пены определяется с помощью массовых долей основных ее компонентов.

Учитывая неоднородность состава потока компрессионной пены, ее теплоемкость,  $C_{\text{кп}}$ , предлагается определить с учетом массовых долей основных ее компонентов, используя для этого следующую зависимость:

$$C_{\text{кп}} = C_{\text{вод}} \beta_{\text{вод}} + C_{\text{возд}} \beta_{\text{возд}}, \quad (6)$$

где  $C_{\text{вод}}$  – теплоемкость воды, Дж/(кг·град);  $C_{\text{возд}}$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·град);

Чтобы оценить, насколько адекватно математическая модель описывает исследуемый процесс охлаждения компрессионной пены в насосно-рукавных системах, были организованы полигонные эксперименты.

Одним из важных критериев, определяющих охлаждение компрессионной пены, является 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.

По результатам проведения экспериментальных исследований были получены данные массового расхода компрессионной пены (таблицу 3, рисунок 4).

Из полученных данных видно, что показатель массового расхода в компрессионной пене зависит от ее кратности. Это обусловлено содержанием воздуха в готовой пене. Чем выше кратность компрессионной пены, тем больше содержание в ней воздуха.

Таблица 3 – Результаты проведенных исследований по определению массового расхода компрессионной пены

№ эксперимента	Режим работы установки	Время заполнения емкости, 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	40	2,22
3		9,04	19,80	40	2,19
4		8,86	19,50	40	2,23
5		8,82	19,30	40	2,20
6		8,77	19,40	40	2,21
<b>Средний массовый расход</b>				<b>2,21</b>	
1	10	4,32	4,00	40	0,92
2		4,21	4,10	40	0,97
3		4,15	3,95	40	0,95
4		4,27	4,20	40	0,98
5		4,19	3,98	40	0,94
6		4,23	4,15	40	0,98
<b>Средний массовый расход</b>				<b>0,95</b>	
1	20	7,5	4,24	70	0,57
2		7,32	4,22	70	0,58
3		7,00	4,15	70	0,59
4		7,38	4,13	70	0,56
5		7,20	4,10	70	0,57
6		7,68	4,18	70	0,54
<b>Средний массовый расход</b>				<b>0,56</b>	

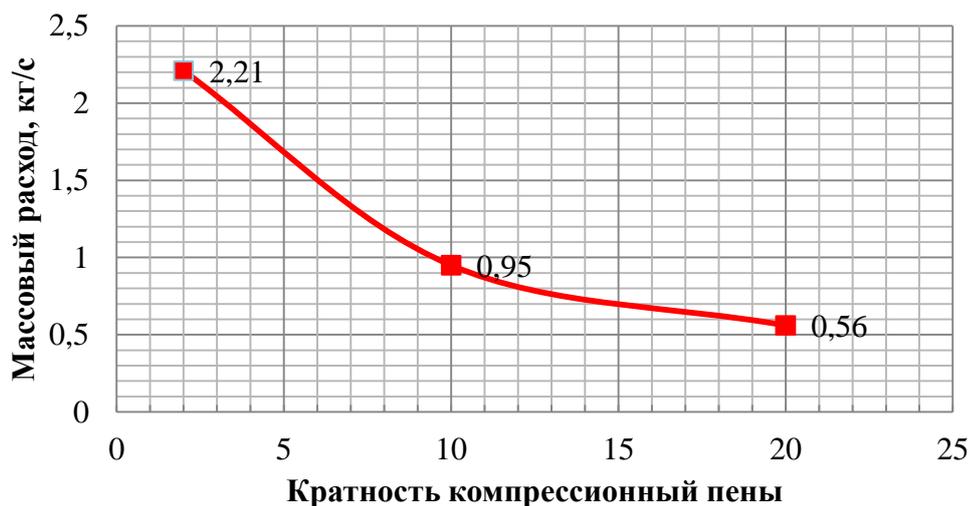


Рисунок 4 – Зависимость массового расхода от ее кратности

В настоящее время в отечественных и зарубежных научных источниках отсутствует информация об исследованиях по определению параметров охлаждения компрессионной пены при движении в насосно-рукавных системах в условиях низких температур. С целью определения данных параметров был разработан измерительный комплекс.

Специальный измерительный комплекс состоит из напорных рукавных вставок с диаметром условного прохода DN50, DN65, DN80 (рисунок 5). С обеих сторон вставок накручены соединительные головки. Поверхность вставок защищена специальным теплоизолирующим материалом, чтобы теплопроводность участка вставки была близка к теплопроводности материала рукава.

Измерительный комплекс использовался для определения параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур. На рисунке 6 представлено подключение вставки измерительного комплекса в насосно-рукавную систему при подаче компрессионной пены.



Рисунок 5 – Рукавные вставки различного диаметра с измерительным прибором и источником питания



Рисунок 6 – Подключение рукавной вставки с температурным датчиком в насосно-рукавную систему при подаче компрессионной пены

В процессе проведения испытаний производилась запись показателей потери температуры по длине рукавной линии. В качестве зависимых параметров были значения кратности, начальной температуры компрессионной пены, длины рукавной линии, диаметра рабочей линии.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны программа и методика.

Принципиальная схема применения специального измерительного комплекса представлена на рисунке 7.

В ходе проведения исследований были получены экспериментальные зависимости охлаждения компрессионной пены в зависимости от режима работы пеногенерирующих установок, которые фиксировались на приемное устройство посредством радиоканала.

Преимуществом разработанного измерительного комплекса является то, что с помощью высокоточных датчиков температуры, встроенных в рукавные вставки, можно было каждую секунду определять изменение температуры с точностью до  $0,01^{\circ}\text{C}$ .

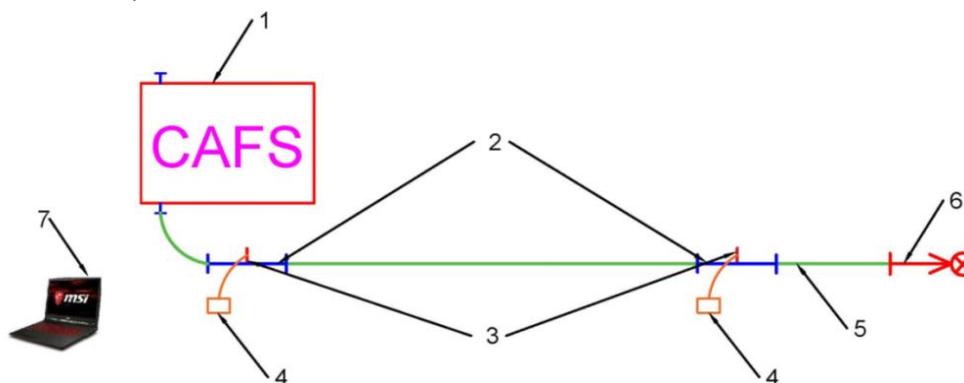


Рисунок 7 – Схема экспериментального исследования оценки охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам:

- 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)

В ходе экспериментальных исследований наблюдалось, что изменение основных параметров насосно-рукавных систем подачи компрессионной пены (кратность, массовый расход, длина рукавной линии) значительно влияют на ее охлаждение в условиях низких температур. Экспериментально было подтверждено, что в системах получения и подачи компрессионной пены баллонного типа давление в системе влияет на кратность пены и режим работы установки.

Часть результатов, полученных в ходе проведения исследований, представлена в таблице 4.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и математического моделирования процесса охлаждения компрессионной пены при движении в насосно-рукавных системах пожарных автомобилей был проведен анализ сходимости данных с использованием критерия Стьюдента. Данный анализ показал высокую сходимость при доверительной вероятности  $p = 0,95$ . Погрешность составила не более 17 % (рисунок 8).

Таблица 4 – Результаты проведенных исследований по определению охлаждения компрессионной пены

Кратность	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $C$ , Дж/(кг·°C)	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
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

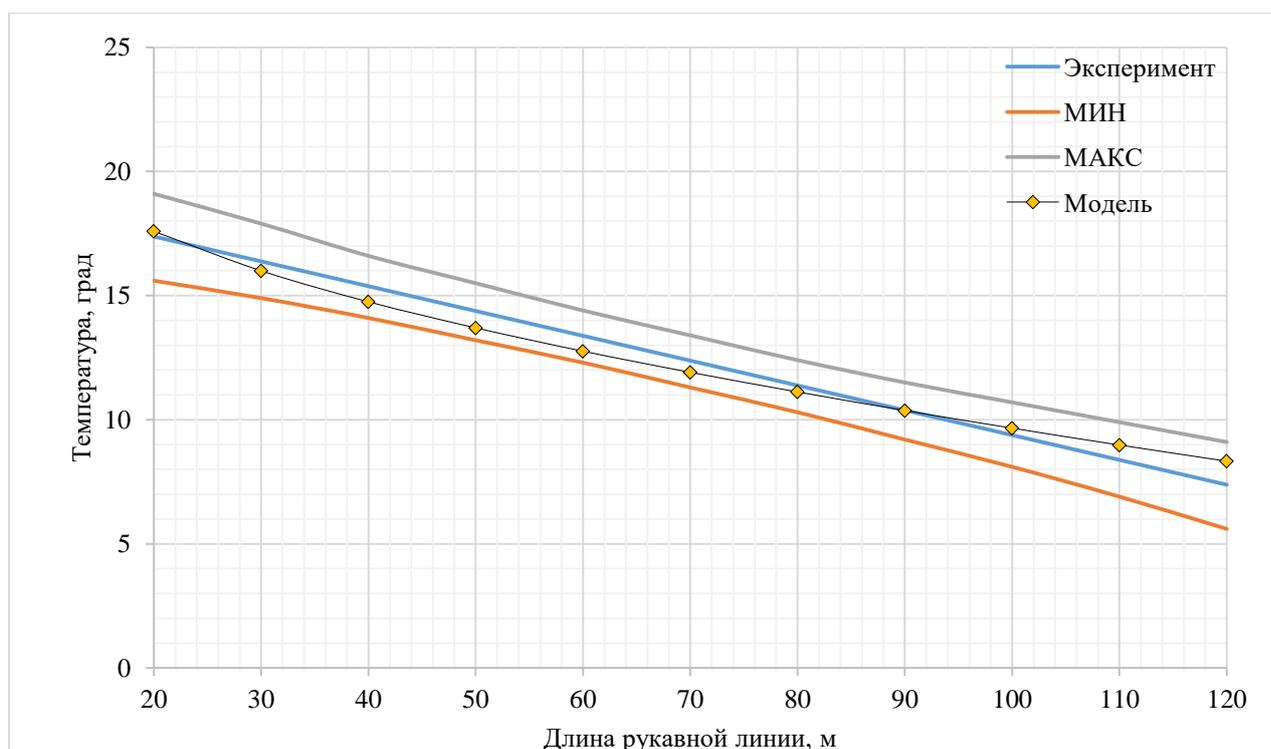


Рисунок 8 – Сопоставление данных, полученных с помощью экспериментальной методики и расчета по модели при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , кратности 2 и скорости ветра 1 м/с

Анализируя результаты определения сходимости математической модели и проведенных экспериментов, 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;

- отклонение 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 выхода компрессионной пены 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 предсказанных значений.

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

Для этого было принято уравнение регрессии вида:

$$T_B = aL + bK + dT + \ln(L) + \ln(K) + e\ln(T) + c \quad (7)$$

где  $T_B$  – температура выхода компрессионной пены из ствола, град;  $T$  – начальная температура, град;  $L$  – длина участка рукавной линии, м;  $K$  – кратность получаемой компрессионной пены;  $a, b, c, d, e$  – коэффициенты для поправки логарифмической функции.

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

$$T_B = 0,1527K + 0,0551L + 0,0481T + 2,4463\ln(K) + 2,9370\ln(L) + 5,1731\ln(T) - 33,8176. \quad (8)$$

**В третьей главе «Технология применения компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики в условиях низких температур воздуха»** на основе проведенных экспериментальных исследований разработан программный комплекс по определению параметров подачи компрессионной пены по насосно-рукавным системам в условиях низких температур окружающей среды.

Для успешной и быстрой ликвидации пожаров на критически важных для экономики страны объектах необходимо предварительное планирование сил и средств. С этой целью для каждого объекта создаются планы и карточки тушения пожаров. Программный комплекс разработан на платформе RAD Studio Embarcadero на языке программирования Delphi и позволяет оценить параметры применения компрессионной пены при ликвидации пожаров на объектах энергетики с применением в качестве огнетушащего вещества компрессионной пены в условиях низких температур окружающей среды.

Данный программный комплекс предназначен для быстрой и эффективной оценки параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам при воздействии низких температур.

Программный комплекс по оценке параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур включает в себя несколько 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.

Программный комплекс позволяет дать оценку параметров охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам в условиях низких температур. В программном комплексе реализовано два подхода к расчетам.

Первый подход позволяет определить конечную температуру компрессионной пены при выходе из ствола при заданных параметрах окружающей среды (температура окружающей среды, скорость ветра), начальной температуры компрессионной пены, длины рукавной линии и кратности компрессионной пены.

Второй подход обеспечивает расчет предельной длины рукавной линии до охлаждения до температуры  $0^{\circ}\text{C}$  при заданных параметрах подачи (кратность, температура компрессионной пены) и окружающей среды (температура окружающей среды и скорость ветра).

Для удобства применения программного комплекса было принято решения о реализации его в одном рабочем окне (рисунок 9).

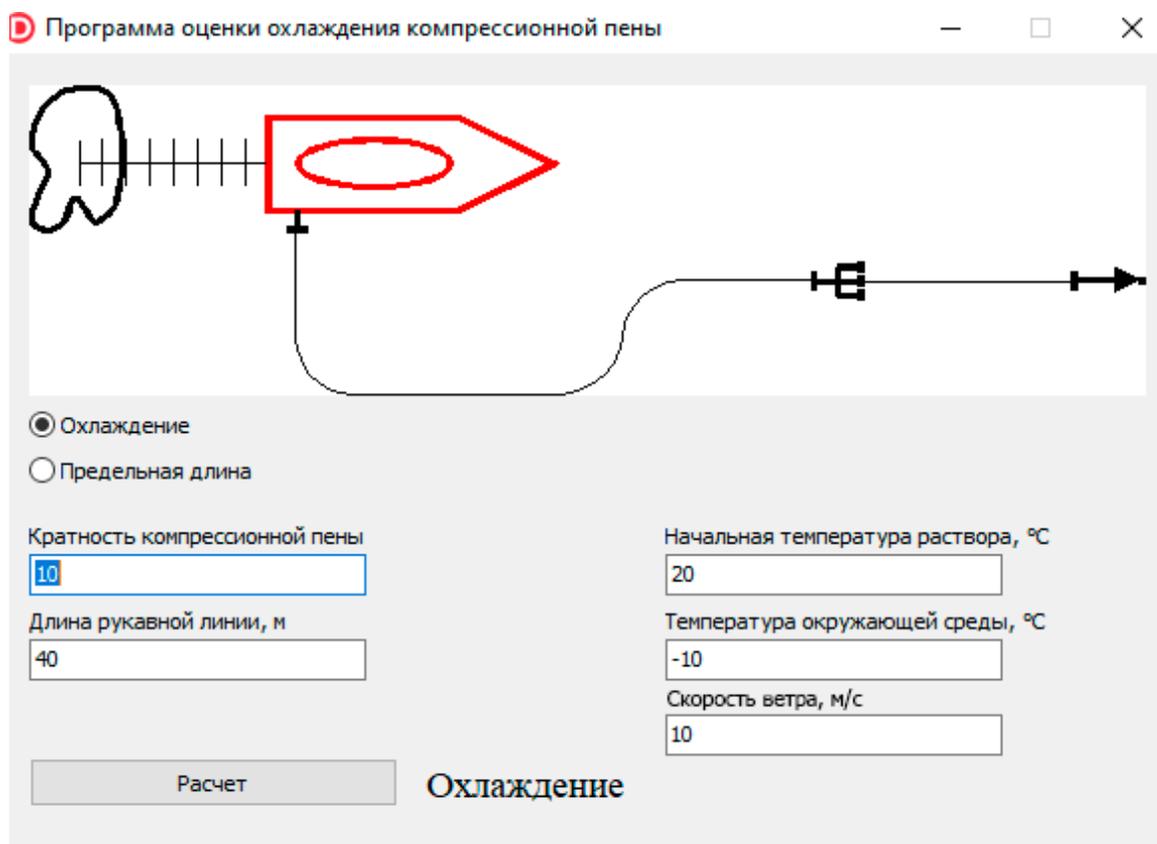


Рисунок 9 – Общий вид программного комплекса

Для повышения эффективности деятельности подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в условиях низких температур с применением технологии получения и подачи компрессионной пены были разработаны соответствующие рекомендации.

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 10).

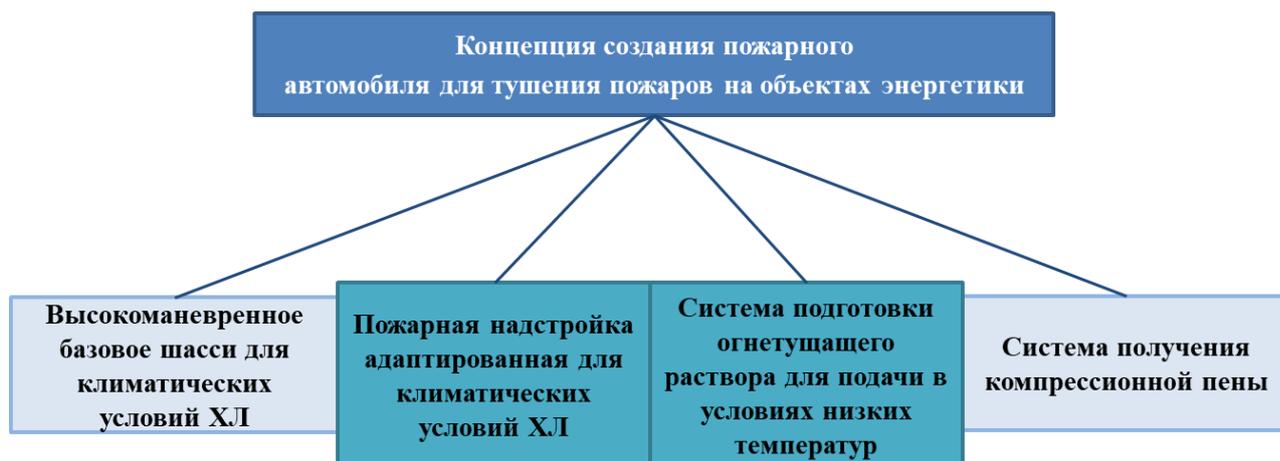


Рисунок 10 – Концепция создания пожарного автомобиля с элементами «северного» исполнения

С учетом тактических возможностей при тушении пожаров наиболее подходящим в качестве пожарного автомобиля для защиты объектов энергетики будет пожарная автоцистерна.

Для оценки эффективности применения пожарных автомобилей с элементами северного исполнения, обеспечивающих работоспособность насосно-рукавных систем при подаче компрессионной пены, было рассмотрено, насколько изменится ситуация в случае тушения пожара.

Проведен анализ расстояний при использовании системы подогрева и без нее при подаче компрессионной пены в условиях низких температур. Объектом исследования была выбрана Кольская АЭС (рисунок 11).

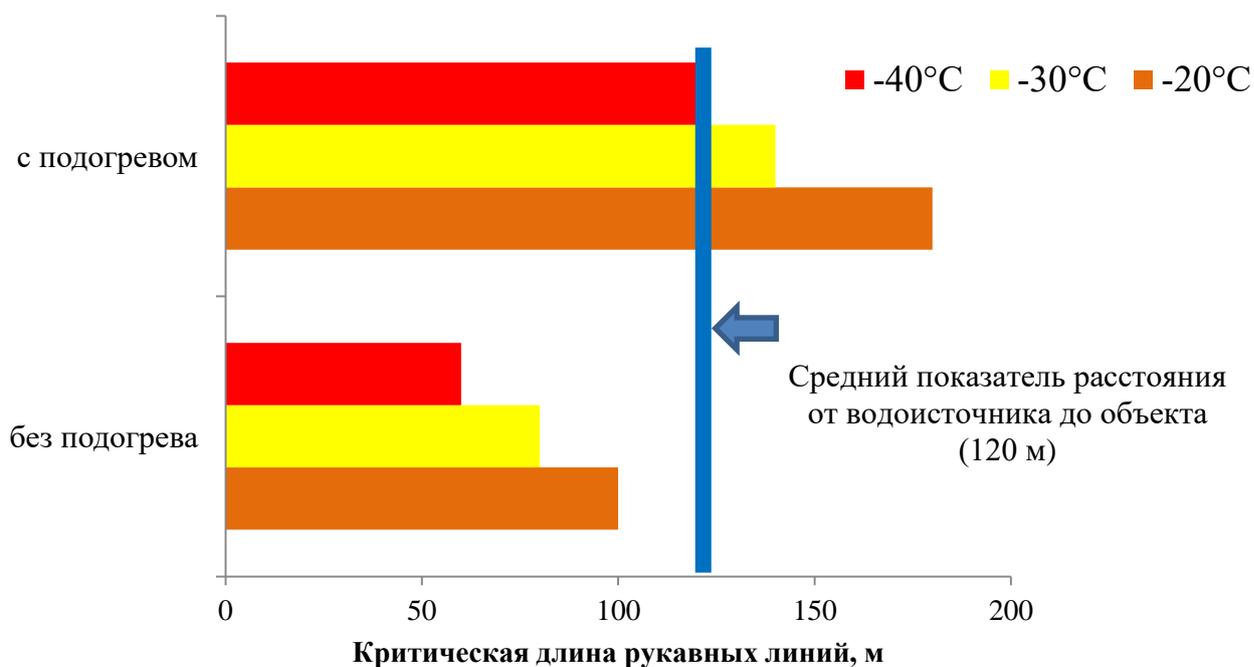


Рисунок 11 – Результаты оценки возможности подачи компрессионной пены для тушения пожаров на Кольской АЭС с учетом наиболее часто повторяющихся метеорологических условий

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что в случае применения для тушения пожара на Кольской АЭС в условиях низких температур предлагаемого пожарного автомобиля с элементами северного исполнения работоспособность насосно-рукавных систем при подаче компрессионной пены будет обеспечена.

## 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.

**Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях, включенных в список ВАК РФ**

1. Гумиров, А. С. Применение компрессионной пены при тушении пожаров объектов нефтегазового комплекса при отрицательных температурах [Текст] / М. В. Алешков, В. Д. Федяев, А. А. Шульпинов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 1. – С. 8–15.

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

3. Гумиров, А. С. 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 // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 2(92). – С. 8–19.

4. 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.

5. Гумиров, А. С. Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях [Текст] / М. В. Алешков,

О. В. Двоенко, А. С. Гумиров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 4. – С. 65–75.

6. Гумиров А.С. Создание измерительного комплекса для определения охлаждения компрессионной пены при подаче по пожарным рукавам в условиях низких температур [Текст] / А. С. Гумиров, М. В. Алешков // Техносферная безопасность. – 2025. – № 2 (47). – С. 69–80.

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

8. Гумиров, А. С. Определение массового расхода компрессионной пены при подаче ее по пожарным рукавам [Текст] / А.С. Гумиров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2025. – № 5. – С. 55–62.

**Остальные публикации по теме диссертации:**

9. Гумиров, А. С. Оценка возможности применения компрессионной пены на плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» [Текст] / А. С. Гумиров, М. В. Алешков, О. В. Двоенко // Системы безопасности: материалы международной научно-технической конференции. – 2021. – № 30. – С. 284–289.

10. Гумиров, А. С. Исследование зависимости расхода компрессионной пены от кратности при подаче по насосно-рукавным системам [Текст] / А. С. Гумиров, А. О. Стругов // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2021. – № 10. – С. 158–161.

11. Гумиров, А. С. Анализ расположения объектов нефтегазового комплекса в России [Текст] / А. С. Гумиров, О. В. Двоенко, А. А. Шульпинов // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2019. – № 8. – С. 196–201.

12. Гумиров, А. С. Мобильные средства тушения пожаров на объектах нефтегазовой отрасли при низких температурах окружающей среды [Текст] / А. А. Шульпинов, А. С. Гумиров // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2019. – № 3(4). – С. 229–233.

13. Гумиров, А. С. Исследования по тушению пожаров объектов нефтегазового комплекса в условиях низких температур [Текст] / А. С. Гумиров // Системы безопасности: материалы международной научно-технической конференции. – 2019. – № 28. – С. 244–249.

14. 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.

15. 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.

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

16. Гумиров, А. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680146 Российская Федерация. Расчет температуры охлаждения компрессионной пены при подаче по насосно-рукавным системам: № 2022669532: заявл. 20.10.2022: опубл. 27.10.2022 / А. С. Гумиров, А. А. Шульпинов, В. Д. Федяев [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669118 Российская Федерация. Программа считывания данных с измерительного комплекса: № 2024667600 : заявл. 30.07.2024 : опубл. 14.08.2024 / А. С. Гумиров, О. В. Двоенко, А. А. Шульпинов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России.

Подписано в печать 01.10.2025. Формат 60×84/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 415

---

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