

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

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи



Меженов Владимир Алексеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СТВОЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
С УНИВЕРСАЛЬНЫМИ НАСАДКАМИ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ
МАШИННЫХ ЗАЛОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Ольховский Иван Александрович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ МАШИННЫХ ЗАЛОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	10
1.1 Анализ статистических данных по пожарам и авариям на объектах энергетического комплекса.....	10
1.1.1 Анализ пожаров в машинных залах атомных электростанций в Российской Федерации и за рубежом.....	18
1.1.2 Анализ пожаров в машинных залах на тепловых и гидроэлектростанциях.....	24
1.1.3 Примеры крупных пожаров в машинных залах электростанций.....	33
1.2 Специфика возникновения и развития пожаров в машинных залах электростанций.....	37
1.3 Существующие технологии применения ствольной техники для защиты машинных залов электростанций.....	43
1.4 Постановка целей и задач исследования	62
1.5 Выводы по первой главе.....	65
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ НАСАДКОВ СТВОЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОГNETУШАЩУЮ СПОСОБНОСТЬ.....	66
2.1 Разработка экспериментального стенда для проведения исследований напорно-расходных характеристик пожарной ствольной техники с универсальными насадками.....	66
2.2 Экспериментальные исследования истечения огнетушащих веществ из универсальных насадков.....	70
2.2.1 Определение влияния конструкции универсального насадка на его гидравлические характеристики	80
2.2.2 Определение влияния конструкции универсального насадка на баллистику струи огнетушащего вещества.....	89

2.2.3 Исследование и обоснование геометрических параметров воздушно-пенного насадка для ствольной пожарной техники.....	104
2.3 Исследование и внедрение технологии осциллирования при использовании ствольной пожарной техники.....	110
2.4 Выводы по второй главе.....	127
ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СТВОЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЗАЩИТЕ МАШИННЫХ ЗАЛОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	129
3.1 Предлагаемая технология применения ствольной техники с учетом результатов исследования.....	129
3.2 Интеграция технологии применения ствольной техники в роботизированную установку пожаротушения машинных залов электростанций.....	132
3.3 Выводы по третьей главе.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	143
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Свидетельство о государственной регистрации программы для электронно-вычислительных машин «Баллистика струи ствольной пожарной техники».....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Акты внедрения.....	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Энергетика является одной из важнейших отраслей экономики Российской Федерации. На объектах энергетики всегда высокие показатели рисков возникновения чрезвычайных ситуаций. С каждым годом риск возникновения чрезвычайной ситуации возрастает из-за ряда причин: высокий коэффициент износа оборудования, несвоевременное выполнение комплекса плановых ремонтных работ, человеческий фактор и другие причины. Особенно важно отметить, что за всю историю статистических наблюдений наибольшее количество аварий и пожаров (около 35 %) случилось в машинных залах электростанций [1-15]. Крупные пожары на таких станциях, как Белоярская атомная электростанция (далее – АЭС), Чернобыльская АЭС показали, что постоянно требуется совершенствование систем противопожарной защиты машинных залов электростанций для недопущения подобного рода аварий. После случившихся вышеуказанных аварий в Советском Союзе были переработаны нормы по требованиям к системам пожаротушения машинных залов электростанций. В современной России они совершенствовались с учетом модернизации технических средств пожаротушения.

На современном этапе развития средств пожаротушения такое техническое средство подачи огнетушащих веществ (далее – ОТВ), как ствольная пожарная техника, претерпела ряд технических модернизационных изменений (применение универсальных насадков, роботизированное управление и т. д.), которые существенно влияют на процесс тушения пожаров и предотвращение аварий в машинных залах электростанций. Для практического применения современной ствольной пожарной техники как в переносном, так и в стационарном исполнении с разными типами управления (ручное, дистанционное, роботизированное) необходимо разработать технологию ее применения, т. е. обеспечить научным обоснованием решение практической задачи пожаротушения.

Степень разработанности темы исследования. Из работ по обеспечению пожарной безопасности на объектах энергетики стоит отметить работы М.В. Алешкова [1–3], А.Д. Ищенко [4, 5], А.А. Колбасина [6, 7], В.Д. Федяева [8], Т.И. Чистякова [9], И.А. Гусева [10, 11], С.Г. Цариченко [12–14], которые занимались исследованиями в области подачи различных видов огнетушащих веществ на оборудование под напряжением, вопросами тактического применения сил и средств, применением пожарной техники в условиях низких температур на объектах энергетики, а также применением роботизированных установок пожаротушения.

Среди работ по исследованию движения огнетушащих веществ в ствольной технике и конструкции универсальных насадков можно выделить труды Ю.И. Горбаня, Е.А. Синельниковой [15–33], а также В.А. Варганова [34]. Вопросами исследования истечения жидкости из пожарных стволов и баллистикой струй занимались Н.А. Тарасов-Агалаков [35] и Ю.Г. Абросимов [36]. Значимые достижения в изучении и создании ствольной техники легли работы ученых из Республики Беларусь: В.В. Пармона [37], И.В. Карпенчука и Д.А. Шафранского [38], также данной проблематикой занимались ученые из Соединенных Штатов Америки, в частности, большой вклад в исследование и создание универсальных насадков вложил Клайд Макмиллан [39].

В целом, до настоящего момента научные исследования в области ствольной пожарной техники опирались на исследования пожарных стволов с насадками конусного типа, следовательно, технология применения ствольной техники на объектах защиты до сих пор основывается на тактико-технических показателях стволов с конусными насадками. Но стоит отметить, что в практике пожаротушения существовали попытки расстановки ствольной пожарной техники с универсальными насадками на объектах защиты, путем подбора эмпирических коэффициентов и адаптирования под технологию расстановки ствольной техники с конусными насадками. Апромаксиационный метод подбора вспомогательных коэффициентов обуславливался тем, что технические показатели универсальных насадков не изучены, в частности в нормативно-технической и научной

литературе отсутствуют коэффициенты расхода и гидравлического сопротивления. Данные показатели являются неотъемлемой частью всего гидравлического расчета установок пожаротушения, однако в практике применения на сегодняшний день используют коэффициенты расхода и коэффициенты сопротивления, полученные для конусных насадков, или эмпирически подобранные данные. Научный подход и обоснование вышеуказанных показателей позволит в будущем обеспечить изготовление ствольной пожарной техники с универсальными насадками, которые будут обеспечивать повышенные показатели покрытия горючих поверхностей и интенсивности орошения. Научно обоснованные гидравлические показатели универсальных насадков можно активно внедрять в роботизированные установки пожаротушения машинных залов на базе пожарных лафетных стволов. Исходя из совокупности полученных данных, будет сформирована технология применения ствольной техники с универсальными насадками для тушения пожаров машинных залов.

Цель работы – сформировать технологию применения ствольной техники с универсальными насадками в составе роботизированной установки пожаротушения машинных залов электростанций.

Объект исследования – процесс тушения пожаров на объектах энергетики.

Предмет исследования – параметры и технология применения ствольной техники при тушении пожаров машинных залов электростанций.

Для достижения поставленной цели актуальными научными **задачами** являются:

1. Анализ пожаров на объектах энергетики, с целью оценки эффективности существующих средств противопожарной защиты машинных залов электростанций.

2. Экспериментальное исследование гидродинамических показателей ствольной пожарной техники для обоснования оптимальной конструкции универсального насадка.

3. Разработка модели движения ОТВ в атмосфере после его выхода из универсального насадка для обоснования расстановки ствольной техники.

4. Разработка технологии применения ствольной техники с универсальными насадками и ее интеграция в роботизированные установки пожаротушения машинных залов электростанций.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– получен коэффициент расхода и коэффициент местного сопротивления для универсальных насадков ствольной пожарной техники;

– получены зависимости по определению расхода ОТВ из ствольной пожарной техники с универсальными насадками;

– получены зависимости для расчета баллистики струи ОТВ из универсальных насадков ствольной пожарной техники.

Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что получены данные и математические зависимости, позволяющие оценить тактико-технические характеристики стволов с универсальными насадками.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования:

– разработан стенд для определения гидравлических характеристик ствольной пожарной техники с универсальными насадками;

– разработана технология применения универсальных насадков ствольной пожарной техники для защиты машинных залов электростанций;

– обоснованы требования к конструкции и созданы опытные образцы роботизированных пожарных лафетных стволов с универсальными насадками, интегрированные в разработанную автономно-адаптивную систему управления роботизированной установкой пожаротушения машинных залов электростанций.

Практическая значимость исследования подтверждается натурными испытаниями на полигоне Калининской АЭС роботизированной установки пожаротушения машинных залов электростанций на базе ствольной пожарной техники с универсальными насадками, которые изготовлены с учетом результатов, полученных в диссертационной работе.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использованы методы теории гидравлики, методы математического

моделирования, физического эксперимента, наблюдения, сравнения, определения эмпирической зависимости в результате математической обработки экспериментальных данных, описания и обобщения.

Положения, выносимые на защиту:

– анализ пожаров на объектах энергетики и оценка эффективности существующих средств противопожарной защиты машинных залов электростанций;

– методика и результаты исследования гидравлических характеристик универсальных насадков ствольной пожарной техники;

– физические зависимости баллистики струи ОТВ при ее подаче из ствольной пожарной техники с универсальными насадками;

– метод нахождения очага пожара роботизированной установкой пожаротушения машинных залов электростанций.

Степень достоверности основных результатов, выводов и рекомендаций диссертации обусловлена применением современных методов и средств исследований. Экспериментальные исследования выполнялись с применением измерительного оборудования, прошедшего поверку в аккредитованной лаборатории Академии ГПС МЧС России.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы были доложены на следующих конференциях:

– Всероссийская научно-практическая конференция «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технология предупреждения и профилактика возникновения чрезвычайных ситуаций – 2019» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019);

– Международная научно-практическая конференция «Пожарная безопасность: Современные вызовы. Проблемы и пути решения» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020);

– VIII Международная научно-практическая конференция «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2022);

– Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2023» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 5 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России.

Личный вклад автора. Сформулирована цель и задачи научного исследования. Написана программа и методика проведения эксперимента, спроектирован и изготовлен стенд для определения гидравлических характеристик ствольной пожарной техники с универсальными насадками. После проведения экспериментов получены исходные данные для определения коэффициента сопротивления и коэффициента расхода универсальных насадков, осуществлена обработка экспериментальных данных. На основе обработанных экспериментальных данных и полученных зависимостей спроектирована ствольная пожарная техника с универсальными насадками и обоснован алгоритм работы автономно-адаптивной системы управления, роботизированной установки пожаротушения машинных залов электростанций. Экспериментально апробирована работа разработанной автономно-адаптивной системы управления роботизированной установкой пожаротушения машинных залов электростанций, которая базируется на ствольной пожарной технике с разработанными универсальными насадками.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы и приложений. Содержание работы изложено на 169 страницах машинописного текста, включает в себя 14 таблиц, 79 рисунков, список использованной литературы из 109 наименований и 2 приложения.

ГЛАВА 1 ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ МАШИННЫХ ЗАЛОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Стабильное функционирование энергетической системы страны – залог экономически стабильного функционирования и развития всех отраслей жизнедеятельности государства, начиная от бытовых условий жизни населения, заканчивая отраслями разных видов промышленности и производства. Энергетическая отрасль обеспечивает функционирование различных социальных, промышленных, сельскохозяйственных и оборонных объектов. Она играет важную роль в обеспечении необходимых условий для жизнедеятельности людей.

В настоящее время, в связи с быстрым развитием общества и техническим прогрессом, наблюдается значительный рост потребностей в энергоресурсах. По данным АО «Системный оператор единой энергетической системы России» (далее – ЕЭС России), производство электроэнергии в России по итогам 2022 г. составило 1,167 трлн кВт·ч, что на 0,6 % превышает показатель 2021 г. [40]. Российские тепловые электростанции в 2022 г. увеличили выработку в годовом выражении на 3,1 %, до 737 млрд кВт·ч, оставаясь основным поставщиком электроэнергии в единую энергосистему страны с долей 69 % от всего производства электроэнергии. Атомные электростанции выработали 224 млрд кВт·ч, что на 0,5 % больше, чем в 2021 г.

1.1 Анализ статистических данных по пожарам и авариям на объектах энергетического комплекса

Электроэнергетическая отрасль состоит из нескольких структурных элементов, включая генерирующие мощности, системы преобразования, системы передачи и распределения электроэнергии. Эти элементы образуют комплекс производственных и имущественных объектов, связанных в рамках единого

процесса производства и передачи электрической энергии. Все эти элементы функционируют под централизованным оперативно-диспетчерским управлением, таким как ЕЭС России [40].

ЕЭС России состоит из 71 региональной системы, которые образуют семь объединенных энергосистем: Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада (рисунок 1.1) [40].



Рисунок 1.1 – Региональное деление энергосистем России [40]

В состав электроэнергетического комплекса ЕЭС России входят 911 электростанций, каждая из которых имеет мощность свыше 5 МВт. На 1 января 2023 г. общая установленная мощность электростанций в ЕЭС России составила 247 601,8 МВт.

Электростанции делятся на пять основных видов по генерации электроэнергии:

- 1) тепловые (ТЭС);
- 2) гидравлические (ГЭС);
- 3) атомные (АЭС);
- 4) солнечные (СЭС);
- 5) ветровые (ВЭС).

Анализ структуры установленной мощности электростанций и выработки электроэнергии в ЕЭС России показывает, что суммарная доля установленной мощности ТЭС, ГЭС и АЭС вместе взятых составляет 98,99 % (рисунок 1.2), суммарная доля выработки электроэнергии ТЭС, ГЭС и АЭС вместе взятых – 99,68 % (рисунок 1.3) [40]. То есть почти вся электроэнергия в Российской Федерации генерируется электростанциями с машинными залами. Это подтверждает актуальность исследования по обеспечению пожарной безопасности машинных залов электростанций.

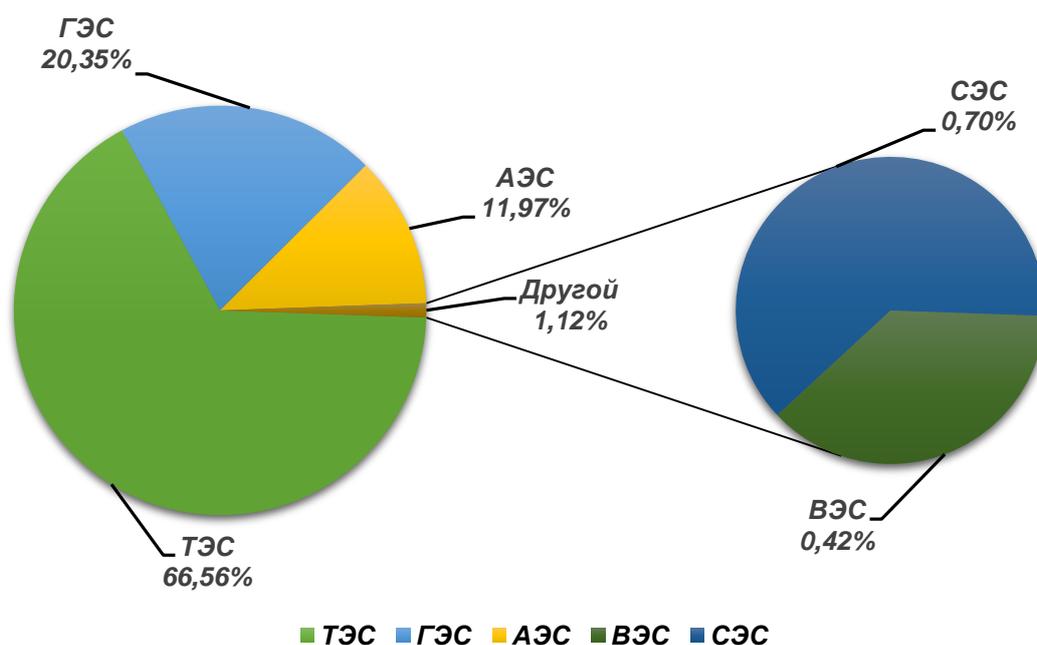


Рисунок 1.2 – Структура установленной мощности электростанций ЕЭС России
(на 01.01.2021 г.) [40]

В 2021 г. общая выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России, включая производство на электростанциях промышленных предприятий, составила 1 114 548,0 млн кВт·ч. Это означает рост производства электроэнергии на 6,4 % по сравнению с объемом производства в 2020 г. Распределение годового объема производства электроэнергии по типам электростанций следующее:

ТЭС – 676 908,0 млн кВт·ч (увеличение производства на 9,1 %);

ГЭС – 209 519,8 млн кВт·ч (увеличение производства на 1 %);

АЭС – 222 244,8 млн кВт·ч (увеличение производства на 3,0 %);

ВЭС – 3 621,7 млн кВт·ч (увеличение производства на 161,7 %);

СЭС – 2 253,8 млн кВт·ч (увеличение производства на 13,7 %).

Динамика изменения потребления электроэнергии и мощности по ЕЭС России представлена на рисунке 1.4.

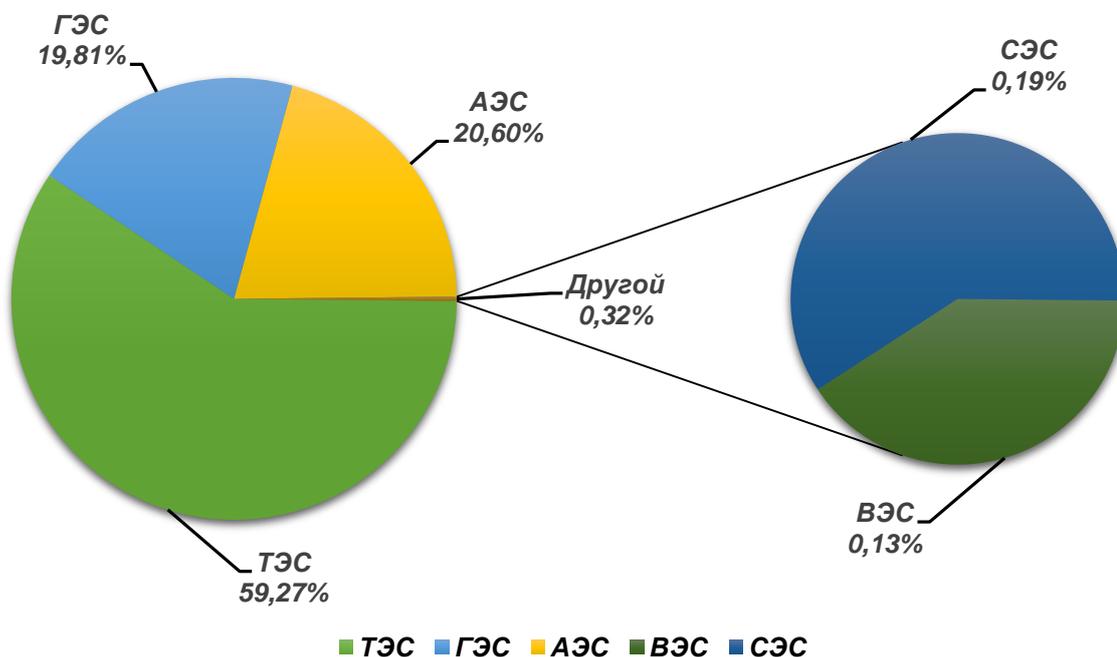


Рисунок 1.3 – Структура выработки электроэнергии в ЕЭС России (на 01.01.2021 г.) [40]

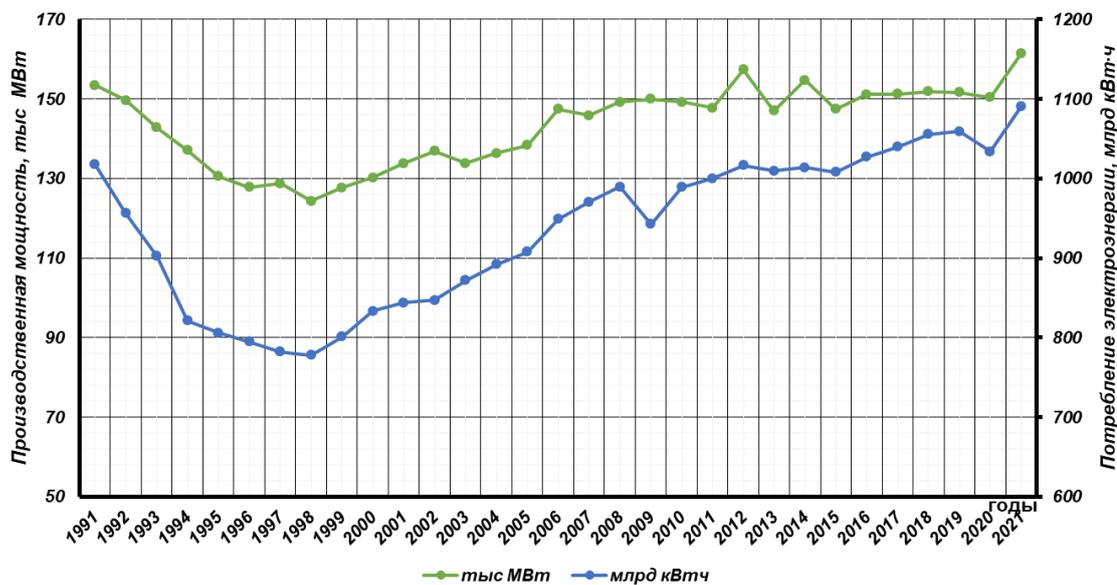


Рисунок 1.4 – Динамика изменения потребления электроэнергии и производимой мощности в Российской Федерации

Потребление электроэнергии в ЕЭС России в 2021 г. составило 1 090 437 млн кВт·ч, что выше факта 2020 г. на 56 717,0 млн кВт·ч (+5,5 %) (при сопоставимых температурных условиях прошлого года и с исключением влияния високосного года – рост оценивается +4,7 %).

Динамика потребления электроэнергии в ЕЭС России по месяцам 2021 г. в сравнении с 2020 и 2019 гг. представлена на рисунке 1.5.

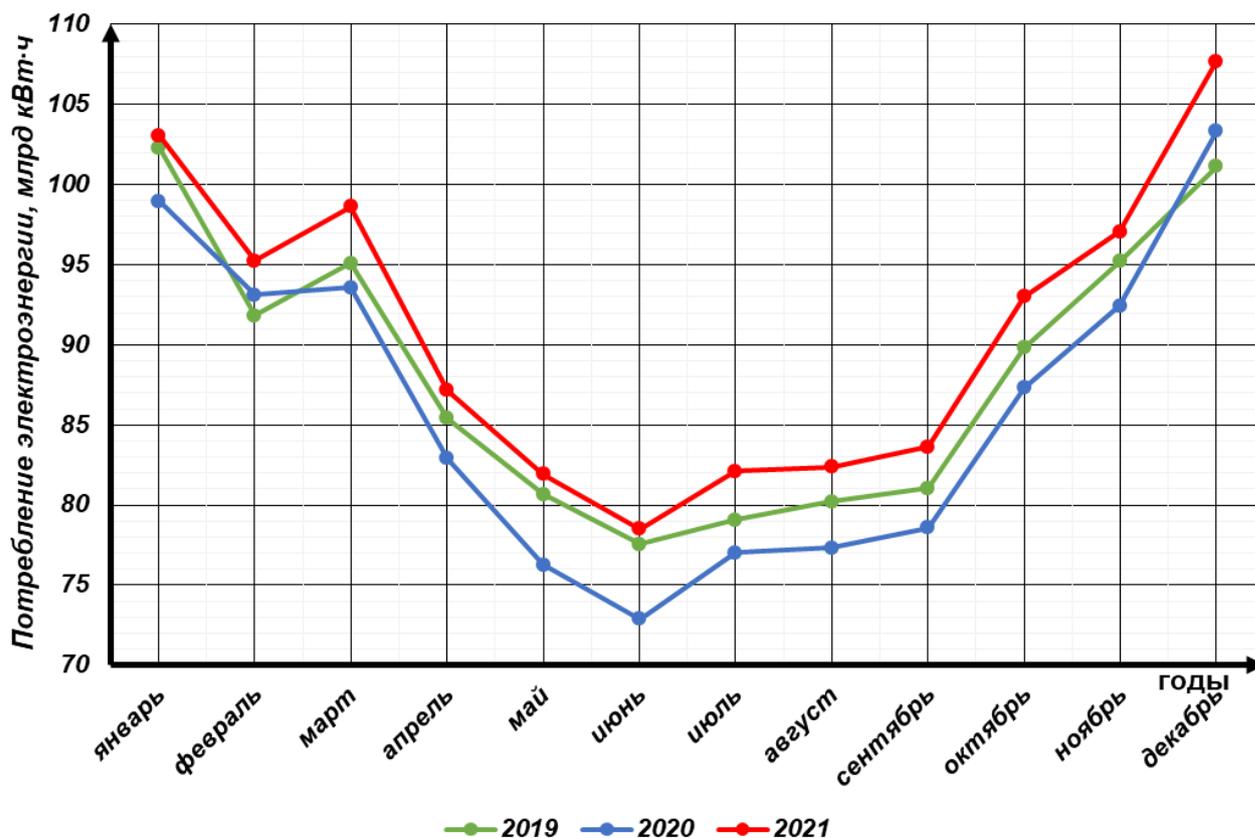


Рисунок 1.5 – Динамика потребления электроэнергии в ЕЭС России по месяцам (2019–2021 гг.)

Как видно из графика на рисунке 1.5, с каждым годом динамика потребления растет, что приводит к дополнительной нагрузке электростанций.

На данный момент энергетика Российской Федерации функционирует в условиях непрерывной работы и высоких нагрузок, что привлекает к ней особое внимание. Для обеспечения безопасной и эффективной работы энергетических объектов осуществляется своевременное техническое обслуживание, ремонт и замена устаревшего оборудования, а также разработка новых технических решений для оптимизации процессов производства, транспортировки и распределения электроэнергии. Кроме того, объекты энергетики оснащаются современным пожарным оборудованием. Однако, на практике, по различным причинам, выполнение всех этих условий не всегда является возможным [10].

Необходимо учитывать, что средний возраст эксплуатируемого оборудования на электростанциях составляет 30 лет, при установленном

нормативе в 40 лет (рисунок 1.6). Все это может негативно сказываться на работе объектов энергетики [41–47].

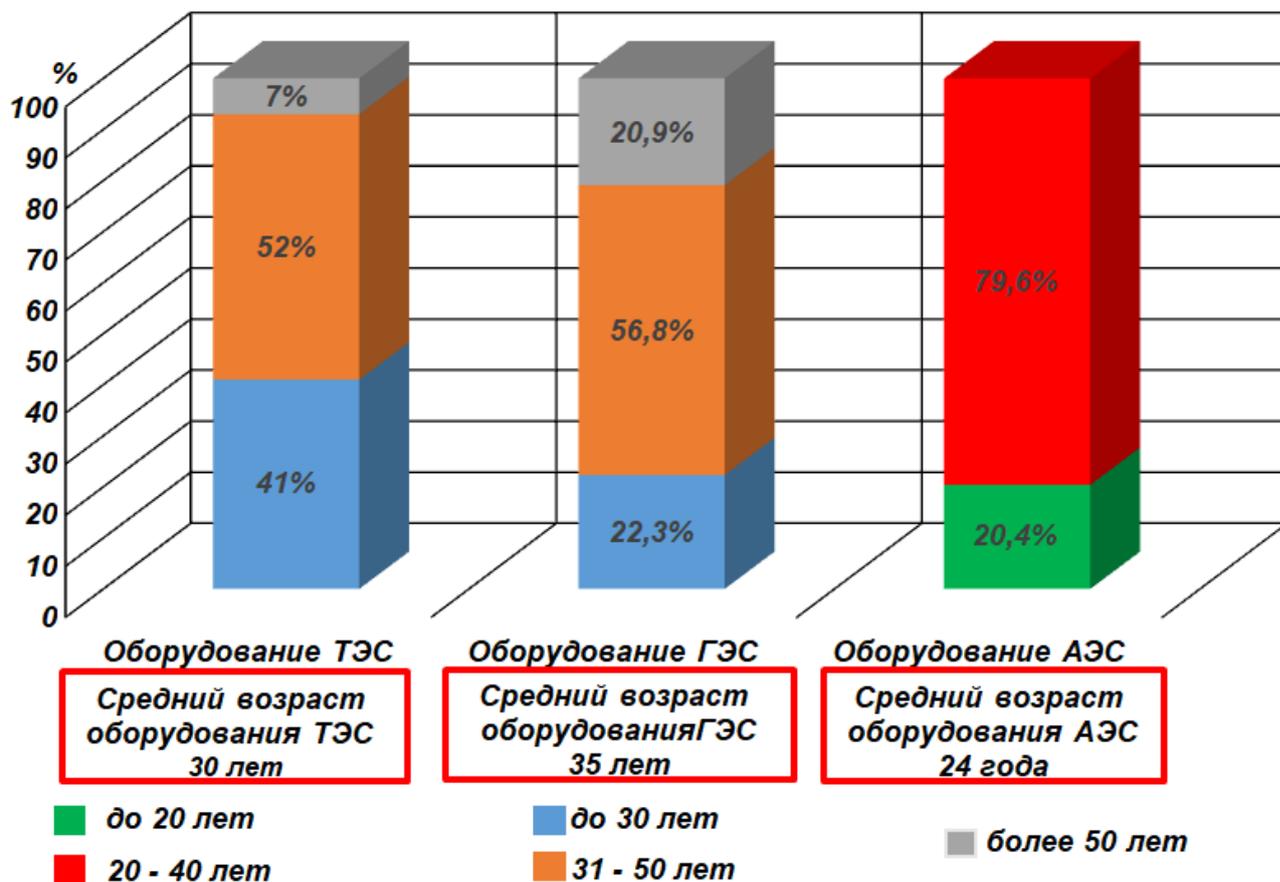


Рисунок 1.6 – Возрастная структура генерирующего оборудования [48]

Износ оборудования может приводить к отказам в его работе, а также вызывать перегрузки и короткие замыкания, что является одной из причин возникновения пожаров. Кроме того, наличие большого количества горючих веществ и материалов на объектах энергетики способствует развитию пожара до крупных размеров [47].

Результаты анализа аварийных ситуаций на объектах энергетики России и разных стран показывают, что машинные залы зачастую являются объектами возникновения аварийных событий. Так, в течение нескольких десятков лет аварийные ситуации, которые сопровождались пожарами и взрывами, происходили в машинных залах в 35 % случаев (рисунок 1.7) [49]. То есть треть всех аварий и пожаров приходит именно на машинные залы.

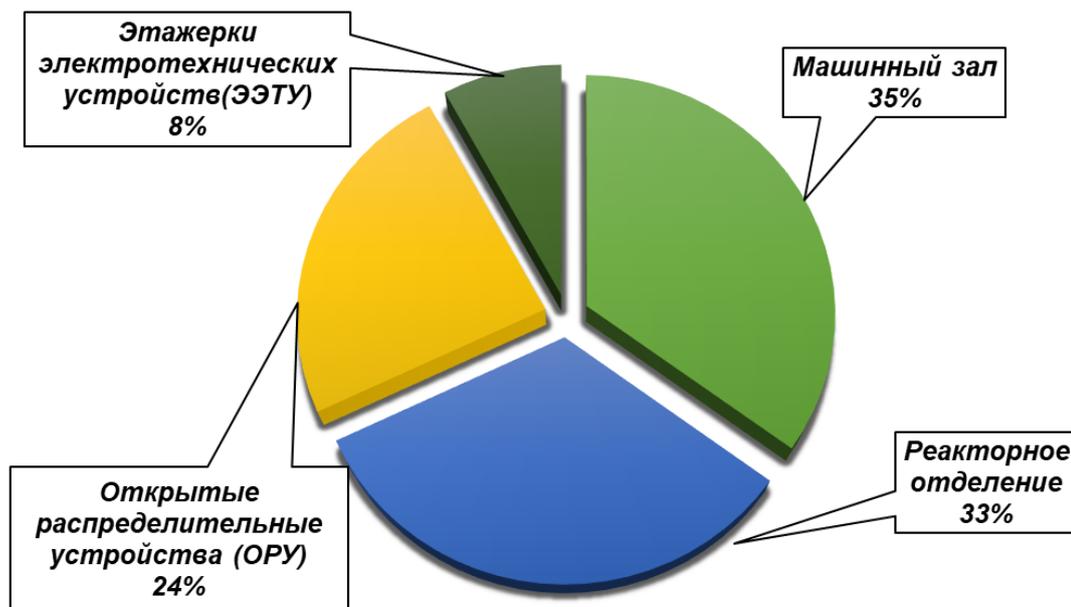


Рисунок 1.7 – Частота возникновения пожаров в помещениях электростанций по местам возникновения

Анализ технологического оборудования, подверженного возникновению пожаров (рисунок 1.8), показал, что на объектах энергетики чаще всего пожарам подвержены кабели и маслопроводы [49], то есть технологическое оборудование, которое непосредственно находится в машинных залах.

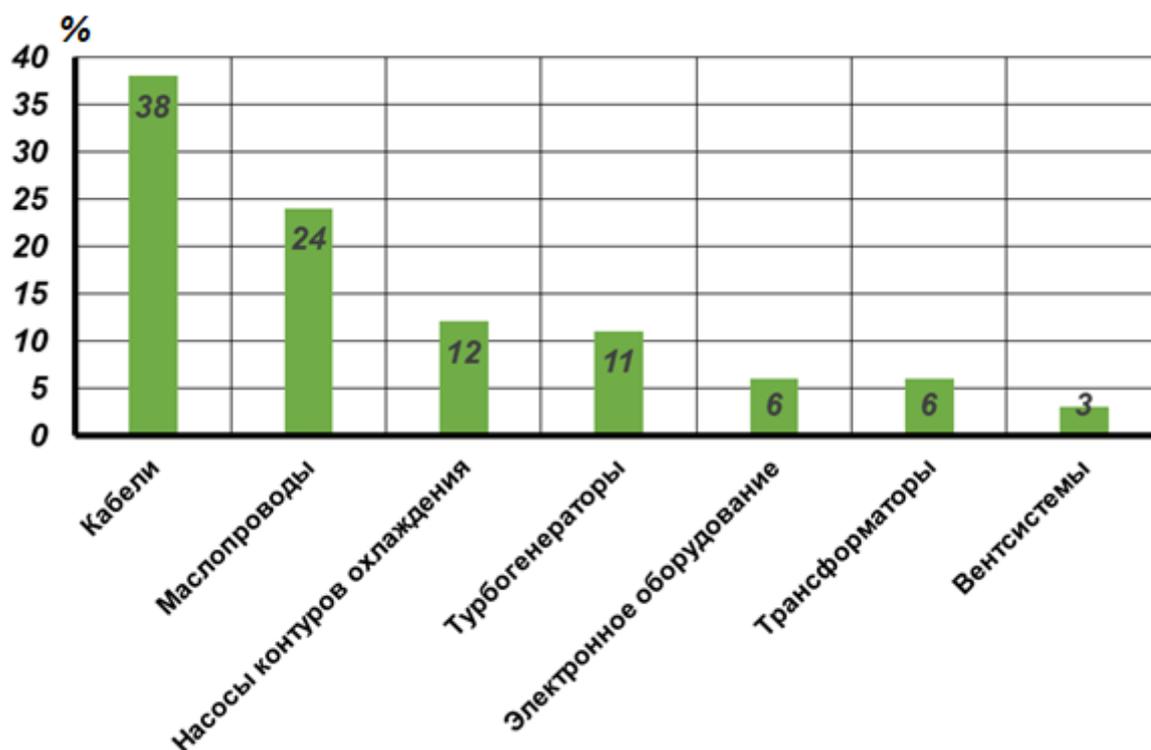


Рисунок 1.8 – Технологическое оборудование, подверженное возникновению пожара [50]

Важно отметить, что быстрому развитию катастрофического пожара с обрушением строительных конструкций машинных залов в основном предшествовали аварийные ситуации, вызванные механическим разрушением узлов турбоагрегатов (далее – ТА).

Сложность обстановки при пожарах в машинных залах обусловлена быстрым распространением пожара из-за наличия большого количества горючих материалов и горючих газов (турбинное масло, оболочка и изоляция электрических кабелей, сгораемая кровля, водород и т. д.).

В диссертационной работе был проведен статистический анализ данных по пожарам на объектах энергетики России, произошедших в период с 2010 по 2020 гг. с присутствием гибели людей (рисунок 1.9).

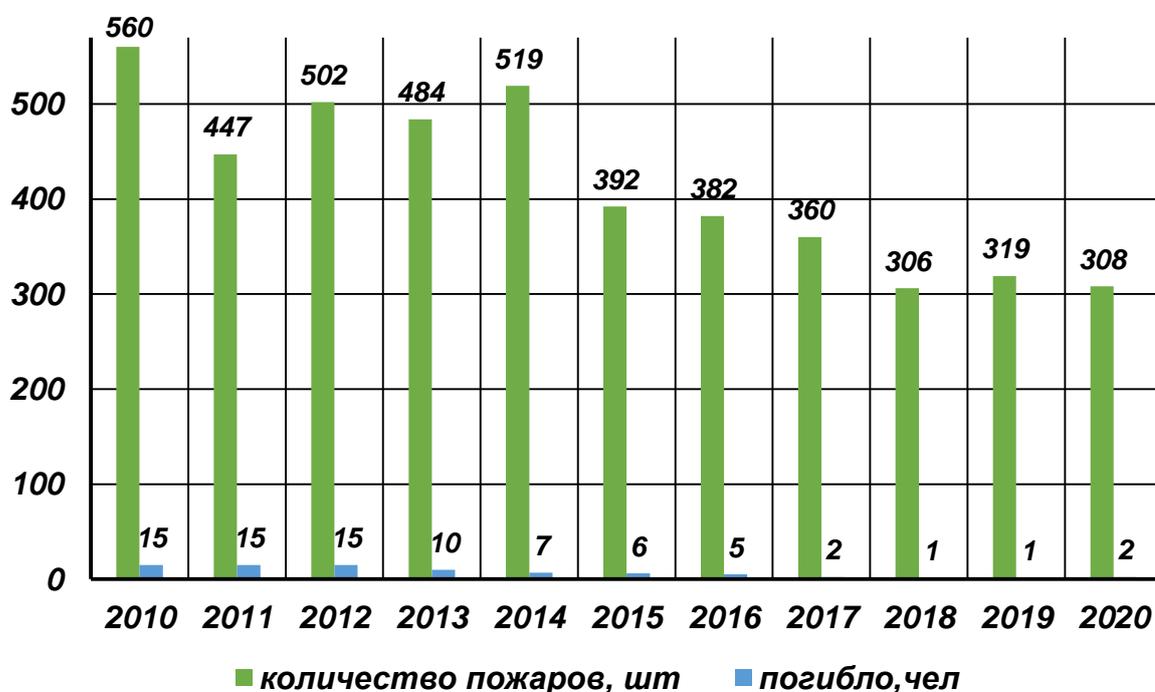


Рисунок 1.9 – Количество пожаров и погибших на объектах энергетики в период с 2010 по 2020 гг.

Количественные показатели говорят о планомерном уменьшении количества пожаров в последние годы на объектах энергетики. Но несмотря на данные факты всё равно необходимо постоянно совершенствовать системы пожаротушения машинных залов электростанций, так как произошедшие в данных помещениях пожары приносят колоссальный прямой и косвенный ущерб, хотя при этом происходят редко. Далее будут проанализированы пожары в машинных залах электростанций.

1.1.1 Анализ пожаров в машинных залах атомных электростанций в Российской Федерации и за рубежом

По статистике [51], с начала XXI в. на электростанциях мира с турбоагрегатами мощностью 150 МВт и более произошло 79 крупных пожаров, в 17 случаях происходило обрушением перекрытия машинного зала, при этом погибло 7 человек.

Средняя частота нарушений в работе турбогенераторов в машинных залах, сопровождающихся загораниями, отечественных электростанций имела порядок 0,01 (отказ на генератор в год)[52]. В машинных залах США средняя частота пожаров на турбоагрегатах в год составляла 0,018. Отчеты Всемирной организации эксплуатирующих атомные станции [53, 54], говорят о том, что 25 % аварий характеризуются большим разбросом ценового обоснования ущерба и находятся в диапазоне от 7,7 до 130,8 млн \$ при среднем значении 40–50 млн \$. По этим же оценкам, средний период восстановления машинных залов электростанций около 10 месяцев.

Результаты анализа аварийных ситуаций, связанных с возгораниями, пожарами и взрывами, как в России, так и за рубежом за последние десятки лет показывают, что в первую очередь к быстрому развитию катастрофического пожара с повреждением строительных конструкций машинных залов приводит разрушение узлов турбоагрегатов.

Разрушение турбоагрегатов приводит к разливу турбинного масла, его горению и вследствие чего к повреждению перекрытия (ферм, кровли). В 70 % случаев пожаров на электростанциях, две трети происходят из-за разрушения турбины, а остальные случаи связаны с повреждениями бандажных узлов. Разрушение турбины всегда сопровождается проливом большого количества масла, выбросом водорода и возникновением пожаров масла и водорода.

Следующими по значимости являются разуплотнения напорных маслопроводов (фонтанирование и утечка масла с пропиткой теплоизоляции)

и разуплотнения системы водородного охлаждения турбогенератора – утечки, приводящие к накоплению водородно-воздушной смеси (через неплотности выводов – в токопроводы, через уплотнения вала – в картеры подшипников).

Утечки масла с возгоранием имели катастрофические последствия (пожары) примерно в 17 % случаев. Утечки водорода с возгоранием имели катастрофические последствия (взрывы и пожары) примерно в 18 % случаев, в том числе взрывы с гибелью людей – в 6 % случаев. Большая часть утечек масла и водорода происходит по вине эксплуатационного и ремонтного персонала.

Пожар масла на отметке обслуживания турбоустановки представляет серьезную опасность как для металлоконструкций стропильных ферм кровли, так и для колонн машинного зала [55,56]. Значительное тепловыделение от сгорания водорода в первые минуты аварии с разрушением турбоагрегата ускоряет прогрев несущих металлических конструкций машинного зала.

Анализ по частоте возгорания материалов в машинных залах показывает, что наибольшее количество пожаров происходит от возгорания трансформаторного масла – 29 %, от возгорания изоляции кабеля – 25 %, от взрывов и загораний паров масла в системах регулирования и охлаждения – 12 %, от возгорания смазки подшипников – 11 %, взрывов, горения водорода в системе охлаждения – 14 % и возгорания пускателей и переключателей – 9 % (рисунок 1.10) [55–57].

Основными причинами пожаров в машинных залах [58] являются:

- механическое разрушение оборудования турбоагрегатов – 59 %;
- разуплотнение маслосистем турбоагрегатов – 19 %;
- разуплотнение систем водородного охлаждения генератора – 16 %;
- ошибочные действия персонала при переводе генератора с водорода на воздух – 3 %;
- горение кабельных трасс с распространением на маслобак и вдоль машинного зала – 3 %.

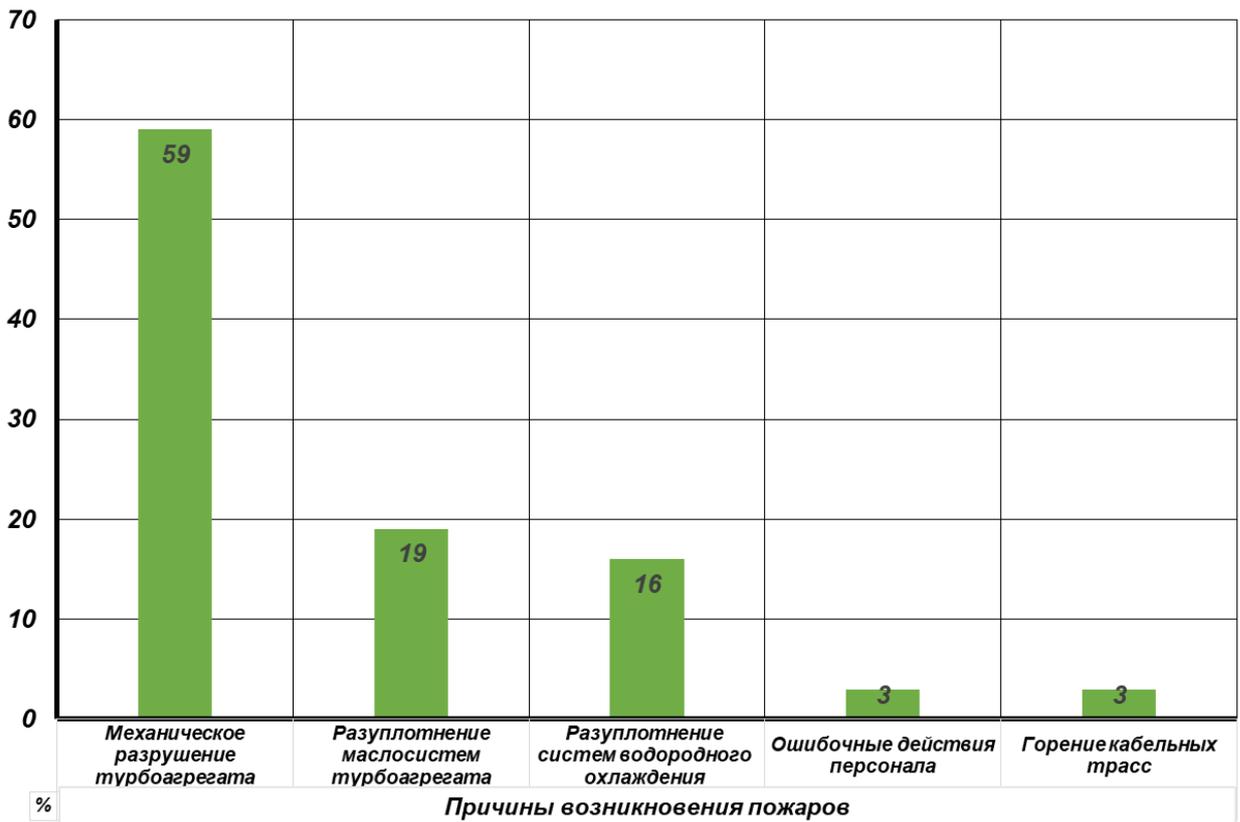


Рисунок 1.10 – Основные причины пожаров в машинных залах

В конце XX в. – начале XXI в. на зарубежных АЭС доля крупных пожаров составила около 0,5 %, средних – 8–9 %, остальные – это незначительные пожары, при которых не происходило выхода радиоактивных веществ из ядерного реактора. В таблице 1.1 представлена статистика событий с пожарами в машинных залах зарубежных АЭС по материалам отчетов Парижского, Атлантического, Токийского центров и Всемирной организации эксплуатирующих атомные станции [57, 59].

Следует отметить различную степень описания произошедших событий. Вместе с тем основное внимание следует уделить частоте данных событий и тяжести наступивших последствий.

Таблица 1.1 – Статистика пожаров в машинных залах зарубежных АЭС

Дата	АЭС	Объект пожара	Событие	Последствия
19.11.2009	«Касивадзаки-Карива»	Турбинный зал 3	Возгорание в тормозной части потолочного крана	Тушение силами персонала АЭС. Угрозы утечки радиации и пострадавших нет
23.10.2011	Oskarshamn Nuclear	Машинный зал 2-го блока	Возгорание вследствие протечки масла на горячие стенки оборудования турбины	Остановка реактора
17.08.2012	Torness 2	Турбогенератор	Возгорание изоляции баллонов системы пара высокого давления	Локальное повреждение паропровода под цилиндром ВД TG2. Останов. Это привело к потере выпуска 0.464GWh. Была вероятность возникновения крупного события, приводящего к значительным последствиям и возможной гибели персонала станции или экстренных служб
01.01.2013	PickeringA1	Машинный зал, система очистки турбинного масла	Пожар в системе очистки масла турбины	Неисправность системы очистки смазочного масла привела к пожару в турбинном зале, повреждению оборудования и кабелей, а также к останову в течение 45 дней
09.01.2013	Narora 1	Турбогенератор	Ручной останов реактора и турбогенератора из-за пожара на подшипнике 5 турбогенератора NAPS-1	Событие привело к ручному отключению турбоагрегата и останову реактора, а также к вынужденному отключению установки в течение примерно 29 дней. Пожар привел к повреждению кабелей КИП в районе зоны подшипников-5. Кроме того, различные степени повреждения получили также прокладки водородных охладителей, их изолирующие клапаны, фланцы маслопроводов уплотнений и различные другие фланцы в зоне термического воздействия
25.02.2013	DungenessB 1	Машинный зал	Пожар на панели сброса напряжения T/A21/2located в подвале турбогенератора 21	Неисправность переносного очистителя масла и выведение персонала (пожарной группы) из штатного состава

11.04.2013	Wolf Creek1	Машинный зал, кровля пом. резервного бойлера	Извещение о необычном событии из-за пожара в лестничной клетке здания турбины и крыши вспомогательной бойлерной	Объявлена Аварийная обстановка, 3 человека из персонала, участвующих в тушении, получили термические травмы
20.04.2013	Hartlepool2	Машинный зал	Незначительное возгорание в МЗтурбины	Произошло возгорание и значительное количество дыма поступило в турбинный зал. Утечка повредила соседние кабели ипротивопожарные системы
02.05.2013	HeyshamA2	Турбогенератор	Останов реактора R2 из-за возгорания на трубопроводной обвязке турбины	Пожар в районе турбоагрегата 2, в результате чего Блок 2 был вручную остановлен
20.05.2013	Pilgrim 1	Маслонасос турбины	Отказ двигателя маслонасоса турбины привел к пожару в двигателе вспомогательного масляного насоса турбины и останову реактора в процессе пуска после перезагрузки топлива	Пожар привел к вынужденному останову реактора. Это событие привело к задержке запуска завода приблизительно на два дня
24.06.2013	Bugey 5	Генератор	Останов реактора энергоблока 5 с последующей ручной остановкой турбины, ввиду высокого уровня вибраций в районе генератора	Ручной останов турбины с последующим отключением реактора (54 дня останова). Пожар вне зоны радиационного контроля, приводящий к срабатыванию плана аварийной ситуации на месте.
26.07.2013	Callaway 1	МЗ	Автоматическая остановка реактора с извещением о пожаре в здании турбины	Повреждение фазной изоляционной втулки резервного трансформатора и соединительной коробки нейтрали генератора

02.09.2013	Palo Verde2	МЗ	Извещение о необычном событии из-за пожара в здании турбины	В результате пожара был реализован план обеспечения готовности к чрезвычайной ситуации на станции
15.03.2014	Hartlepool2	МЗ	Незначительное возгорание в МЗ турбины TG2	Следствием стал останов реактора вручную, потеря генерации (142 ГВт·ч) до завершения восстановления событий и повторного запуска установки. Значительные объемы отходов образовались в результате очистки TG2
02.04.2014	Quad Cities2	МЗ	Останов реактора в ручном режиме и тревога из-за пожара в здании турбины. Утечка пара привела к замыканию на землю, пожару и ручному срабатыванию	Повреждение значительного количества кабелей, продление ППР на 15 суток, а также многочисленные отказы оборудования и ошибки персонала, которые увеличили серьезность события
01.07.2014	Dungeness B 1	МЗ	Возгорание изоляции во время пуска блока 21	Пожарные потушили пламя. Турбина была вручную остановлена, загрязнение маслом. Персонал не пострадал
01.12.2014	Sizewell B1	Турбогенератор	Возгорание уплотнения системы отвода водорода с включением системы орошения турбогенератора 2	Пожар на торце водородного уплотнения привода генератора и последующий дренаж TG2 генератора. Пожар представлял угрозу для персонала, который мог находиться рядом с генератором в то время. Событие задержало загрузку TG2 приблизительно на 12 часов с последующей потерей генерации
03.07.2015	АЭС «Палюэль»	Конденсатор ТГ 2	Возгорание в 22:30, в районе конденсатора турбины. Сварочные работы велись на конденсаторе турбины	70 пожарных более 6 часов тушили возгорание. Температура огня была настолько высокой, что в МЗ горели части металлического оборудования. Персонал эвакуирован. Частичное обрушение конструкций. Остановка более 3-х месяцев

1.1.2 Анализ пожаров в машинных залах на тепловых и гидроэлектростанциях

Статистические наблюдения с 1970 г. по настоящее время показывают, что в главных корпусах ТЭС и ГЭС произошло 30 аварий с остановкой хотя бы одного энергоблока. В период с 1970 по 2000 гг. произошло 14 аварий, а с 2000 по 2020 гг. – 16 [49].

При этом стоит отметить, что из 30 аварий, 27 аварий (90 %) сопровождалась пожарами. Из всех аварий около 72 % происходили в машинных отделениях, 23 % – в котельных отделениях, и 5 % – в кабельных туннелях (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Пожары на ТЭС и ГЭС по местам возникновения

Пожары, которые возникают в машинных залах ТЭС и ГЭС, в первую очередь связаны с нарушениями целостности систем смазки и турбоагрегатов. В турбоагрегате в основном используется нефтяное турбинное масло с температурой воспламенения 180 °С. При этом системы подачи масла, как

правило, находятся рядом с горячими поверхностями турбин и источниками искрообразования. Нарушение герметичности этих систем может быть вызвано различными причинами [60].

Анализ пожаров, произошедших в 2011–2020 гг. на объектах энергетики, позволил установить, что доля пожаров на энергопроизводящих объектах, которые приводят к остановке технологического процесса, достигает в отдельные годы половины от общего числа пожаров (рисунок 1.12) [1–5,11–13].

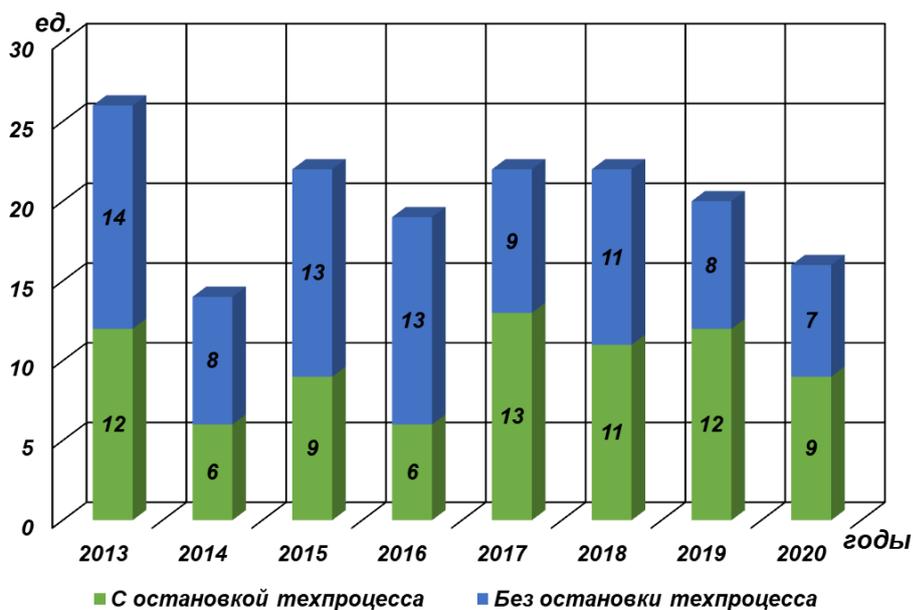


Рисунок 1.12 – Последствия пожаров в сфере энергопроизводящих объектов за 2013–2020 гг.

При этом, стоит отметить, что последствия пожаров в сфере энергопроизводящих объектов делятся в примерном соотношении 50% на 50% независимо от общего количества пожаров в отдельном годе (рисунок 1.12). То есть практически в половине случаев выработка энергии останавливается, что наносит колоссальный прямой и косвенный ущерб. Особенно важно не допускать таких остановок в промышленных районах страны, так как в некоторых производственных цепочках остановка подачи электричества хотя бы на час может привести к остановке производства на дни и недели.

Для наиболее наглядного обобщения колоссального ущерба, который может принести пожар в машинном зале, в таблице 1.2 приведена статистика наиболее значимых событий, связанных с пожарами в машинных залах электростанций.

Как видно из таблицы 1.2, последствия пожаров в машинных залах в основном возникают на ТЭС и ТЭЦ. Это можно объяснить двумя факторами:

1) основная доля энергопроизводства приходится именно на эти объекты энергетики (рисунок 1.3), т. е. данные объекты находятся постоянно в нагрузочном режиме работы;

2) на данных электростанциях нет таких строгих мер пожарной и промышленной безопасности, как к примеру на ГЭС и АЭС.

Примерно в 35 % случаев происходит обрушение кровли машинного зала, практически в половине случаев происходит остановка турбоагрегата. То есть пожар в машинном зале имеет катастрофические последствия, так как выход из строя энергогенерирующего объекта не только может привести к дискомфорту населения, оставив его без электричества, но и может обесточить градообразующие предприятия или предприятия государственной важности, таким образом нанести экономический ущерб государству.

Таблица 1.2 – Статистика наиболее значимых событий, связанных с пожарами в машинных залах электростанций

Дата/ время события	Место пожара (аварии)	Площадь, пути распространения пожара и ОФП	Специфика и время ликвидации	Причина пожара (аварии)	Последствия, ущерб
1990	Экибастузская ГРЭС-1 турбоагрегат энергоблока 5	Произошел обрыв 36 рабочих лопаток в турбоагрегате, что привело к сильной вибрации и отключению турбины. В результате произошла разгерметизация выводов и уплотнений подшипников генератора, что привело к распространению водорода в шинопроводы и камеру выключателя [61]	Данных нет	Данных нет	В результате произошло термическое обрушение ферм кровельного покрытия над энергоблоками 5, 6 и 7. В результате этого инцидента вышло из строя 3 энергоблока мощностью по 500 МВт каждый. Общий ущерб составил 70 млн рублей в ценах 1984 г.
05.10.2002	Каширская ГРЭС Энергоблок 3	Взрыв и полное разрушение генератора и турбины, повреждение фундамента турбоагрегата и колонн стеновых ограждений с его стороны. Обрушение 4-х пролетов кровли машинного зала [61]	Разрушение ротора генератора из-за динамического удара и тормозящих усилий, возникших при разрушении бандажного кольца. Тушили 10 пожарных расчетов	Причиной катастрофических последствий аварии для турбины явилось наличие усталостных трещин крутильного характера в роторе генератора в районе подшипника 6 [61]	Останов и отключение 3-х блоков. Блок 3 восстановлению не подлежал. Ущерб до 1,0 млрд руб. в ценах 2002 г.

20.12.2006 02:55	Рефтинская ГРЭС турбоагрегат МЗ	Площадь пожара 451 м ² . Ударом фрагмента бандажного кольца, имевшего массу 350 кг, сорвало торцевой щит генератора на стороне возбуждителя, что привело к выбросу масла из статора и возникновению пожара. В результате температурного воздействия на металлоконструкции ферм перекрытий и подстропильную балку по ряду А в осях 19-20 произошла деформация балки с разрушением сварных швов крепления балки к опорному столу и ее обрушение, что привело к падению блок-фермы в осях 19-20 машинного зала [61]	На тушении было задействовано 11 единиц пожарной техники. К 7:00 по московскому времени пожар удалось локализовать, в 7:30 пожар был потушен	Короткое замыкание в обмотке низкого напряжения блочного трансформатора. Генератор лишился нагрузки, что равносильно трехфазному короткому замыканию. Число оборотов ротора стало увеличиваться, что привело к разрыву бандажного кольца на стороне возбуждителя	Отключены два энергоблока мощностью 500 МВт каждый. Обрушилась ферма перекрытия, площадь обрушения 2500 м ² . Последствия: - замена генератора, турбины, возбуждителя, - полное восстановление кровли машзала
07.10.2007	Санкт-Петербургская ТЭЦ (цех генераторов)	В цехе турбогенераторов произошел пожар, площадь составила около 50 м ² [61]	Данных нет	Данных нет	В результате от горячего водоснабжения были отключены 650 домов [61]
09.02.2008 19:10	г. Улан-Удэ, ТЭЦ-1 Машинный зал	Хлопок под генератором турбины 6 с выбросом пламени с левой стороны от возбуждителя. В этот же момент хлопок с выбросом пламени с правой стороны под генератором. Воспламенился поток кабелей возле щита турбин. 19:35 на момент прибытия ПЧ горели эл.кабели ТЦ на площади 20 м. погонных. 20:34 получен допуск на тушение, здание и турбина обесточены. Одновременно соснятием напряжения произошел выброс водорода в горящее помещение, с последующим взрывом и обрушением кровли на площади 300 м ² с деформацией ограждающих ж/б конструкций. После взрыва распространение площади пожара до 1000 м ² [49]	21:05 горение в машинном зале на площади 1000 м ² 23:06 горение масла в двух турбоагрегатах, находящихся под обломками обрушившихся строительных конструкций. 10.02.2008 г. 00:38 пожар локализован, в 01:49 пожар ликвидирован	Очаг пожара находился в помещении камеры масляного выключателя В-6-ТГ-6, расположенного на отметке 0.00 в масляном выключателе	Обрушение кровли машинного зала с деформацией ограждающих ж/б конструкций. Ущерб до 3 млрд руб. в ценах 2008 г.

04.09.2009	«Мосэнерго» ТЭЦ, машинное отделение котло- турбинного цеха	Произошла технологическая авария. Взорвался турбогенератор 3 (мощность 25 мВт), после чего произошел выброс машинного масла. Разлившееся на площади 50 м ² масло загорелось [49]	Данных нет	Данных нет	Данных нет
21.10.2011	Курганская ТЭЦ МЗ	Из-за разрушения бандажного кольца ротора генератора произошло внутреннее короткое замыкание в генераторе с выбросом масла и его возгоранием [61]	Данных нет	Данных нет	Пострадали два человека. С термическими ожогами и электротравмами, они доставлены в реанимацию
29.03.2013	Углегорская ТЭЦ турбоагрегат	В результате пожара были разрушены четыре турбины. Пожару предшествовал взрыв в котельно-турбинном цехе [61]	Данных нет	Данных нет	Один человек погиб, пятеро с ожогами и отравлением угарным газом
Ноябрь 2014	ТЭС (письмо Министерства энергетики РФ от 24.05.2016 №4А- 5453/10)	Машинист турбоагрегата обнаружил появление дыма из-под переднего стула турбины. По причине разгерметизации фланцевого соединения и появления сильной течи масла из фланца напорного маслопровода и попадания масла на горячую поверхность в район каминного уплотнения турбины произошло возгорание масла с сильным задымлением в районе переднего стула турбины [49]	Данных нет	Причинами возникновения аварии явились разгерметизация фланцевого соединения, появление течи масла из-под фланца напорного маслопровода и попадание его на горячую поверхность в район каминного уплотнения турбины	В результате пожара произошло повреждение электрооборудования, оборудования КИПиА, контрольных кабелей турбоагрегата, а также возникли механические повреждения подшипников турбины (натиры, следы задеваний шейки вала) [50]
07.12.2015	Василеостровская ТЭЦ, машинный зал	Выброс и горение масла под четвертой турбиной	Площадь пожара 400 м ² . 100 человек эвакуировано	Данных нет	Данных нет

Январь 2015	Сургутская ТЭС МЗ	При выполнении ремонтных работ в системе регулирования питательного турбонасоса (далее - ПТН) произошел выброс турбинного масла на нагретые до высоких температур детали ПТН и его возгорание [49]	В результате возгорания из-за восходящих конвективных потоков над очагом пожара под кровлей МЗ произошло повышение температуры до критических величин, которое явилось причиной деформации стальных конструкций.	Причиной аварии явилось воспламенение турбинного масла из-за его выброса при выемке отсечного золотника в системе регулирования приводной турбины ПТН под воздействием источника зажигания в виде нагретых до высоких температур деталей ротора	Пострадали несколько человек: один получил незначительные ожоги, трое надышались угарным газом. В результате этого произошло обрушение кровли турбинного отделения в осях 24-26, в рядах «А» и «Б» на площади около 1 300 м ²
04.01.2015 09:07	Сургутская ГРЭС-2 Турбинное отделение, блок 4	Возле питательных турбонасосов произошло возгорание масла. Площадь возгорания не менее 400 м ²	В 09:13 произошло обрушение двух пролетов кровли	Данных нет	Площадь обрушения кровли – более 1200 м ²
2015 июнь	ТЭС (письмо Министерства энергетики РФ от 24.05.2016 №4А-5453/10)	При пусковых операциях на турбине энергоблока при наборе оборотов до 3000 об/мин начат переход на главный масляный насос	В 10:30 оперативным персоналом обнаружено возгорание масла в районе 2-го подшипника турбины. Через 55 минут возгорание ликвидировано силами оперативного персонала	Причина- разуплотнение фланцевого соединения маслопровода системы регулирования у сервомотора регулирующих клапанов	Повреждение кабельных линий маслонасосовсмазки и уплотнений постоянного и переменного тока, выплавление баббита вкладышей подшипников турбины, замытие нижних уплотнительных гребней

2015 сентябрь	ТЭС (письмо Министерства энергетики РФ от 24.05.2016 №4А- 5453/10)	При опробовании сигнализации по понижению уровня в гидрозатворе при открытии вентиля произошло снижение уровня масла в гидрозатворе ниже допустимого, в результате чего из гидрозатвора водород поступил в сливной маслопровод подшипников ТА. Через сливной маслопровод в районе щеточно-контактного аппарата и возбуждителя генератора произошло образование взрывоопасной водородно-воздушной смеси последующим ее возгоранием	Данных нет	Причина - снижение уровня масла в гидрозатворе ниже допустимого из-за неисправности открытого вентиля (отсутствие в бугеле вентиля фиксирующей ходовой гайки) во время опробования сигнализации по понижению уровня в гидрозатворе	Повреждение рабочего возбуждителя энергоблока, ЩКА генератора энергоблока, контактных колец генератора энергоблока, силовых кабелей общей протяженностью 1150 м
2015 декабрь	ТЭС (письмо Министерства энергетики РФ от 24.05.2016 №4А- 5453/10)	При выполнении оперативным персоналом операции по уменьшению расхода пара в конденсатор турбины воздействием на конус обратной связи сервомотора поворотной диафрагмы, произошло выкручивание сопряженных элементов данного конструкционного узла, повлекшее за собой его разгерметизацию с выбросом масла в дросселируемом сечении диаметром 25 мм. При разгерметизации турбинное масло под давлением 14 кг/см ² начало фонтанировать из сервомотора поворотной диафрагмы ТА. В результате выброса турбинного масла и при попадании на горячие поверхности турбины (регулирующие клапаны и фланец стопорного клапана) произошло его воспламенение [49]	Вызов пожарной охраны через 6 минут с момента возникновения пожара. Задержка допуска пожарных к тушению. Персонал не оценил в полном объеме ситуацию, степень угрозы оборудованию и, как следствие, не предпринял попыток по мобилизации сил и средств смены для тушения пожара на начальном этапе	Причиной аварии явилось выкручивание резьбовой втулки конуса обратной связи сервомотора привода диафрагмы теплофикационного отбора, при регулировании давления пара в отборе, приведшее к выталкиванию конуса обратной связи из корпуса сервомотора из-за конструктивной недоработки при модернизации узла	В результате пожара произошло частичное обрушение несущих металлоконструкций ферм и бетонных плит перекрытия кровли машинного зала в районе турбоагрегата (между рядом А и Б осями 5-40). Упавшими металлоконструкциями и бетонными плитами частично поврежден ТА и оборудование

Окончание таблицы 1.2

2015 декабрь	ТЭС (письмо Министерства энергетики РФ от 24.05.2016 №4А- 5453/10)	При отключении блока (введен в эксплуатацию 01.10.2015) для определения и устранения причины повышенной вибрации подшипников турбогенератора персоналом обнаружено возгорание турбинного масла в районе 4 и 5 подшипников турбины	Данных нет	Разгерметизация по шву напорного маслопровода подвода масла к подшипникам 4,5 вследствие повышенной вибрации опор подшипников возникшей на выбеге ротора ТГ с выбросом и возгоранием масла [48]	Предпосылки к аварии: наличие протечек масла из системы маслоснабжения и промасленной тепловой изоляции [49]
05.11.2018	ТЭЦ-9 Пермь	Произошло возгорание маслосистемы турбины	Горение удалось ликвидировать спустя 1,5 ч	Нет данных	В результате инцидента станция снизила рабочую мощность на 25 МВт

1.1.3 Примеры крупных пожаров в машинных залах электростанций

Для подтверждения численных показателей опасности пожара в машинных залах электростанций далее в работе необходимо рассмотреть примеры пожаров в машинных залах электростанций.

Подтверждением опасности развития пожара в машинном зале может послужить пожар на Каширской ГРЭС-4, который произошел в 2002 г., причиной пожара стала разрушение турбоагрегата 3 (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Последствия пожара на Каширской ГРЭС-4 [10]

Осколки от лопастного аппарата турбоагрегата повредили несущие строительные конструкции трубопроводов масляной системы и системы охлаждения. Произошел розлив масла с последующим возгоранием. Конвективная колонка от горящего масла привела к обрушению кровли машинного зала. Из-за аварии произошло отключение трех энергоблоков, один из энергоблоков восстановлению не подлежит [62].

Катастрофические последствия аварии были на Чернобыльской АЭС. В ночь на 26 апреля 1986 г., произошел взрыв ядерного реактора РБМК-1000 четвертого энергоблока (рисунок 1.14).

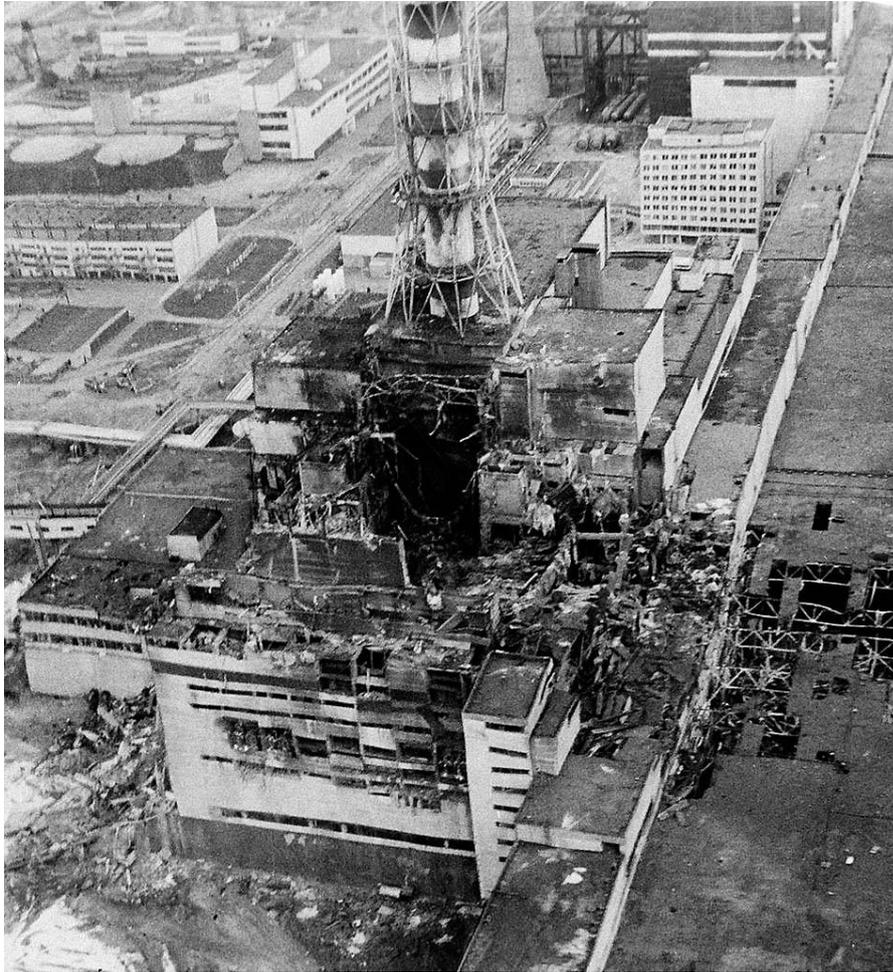


Рисунок 1.14 – Последствия взрыва и пожара на Чернобыльской АЭС [10]

После взрыва произошло частичное разрушение реакторного отделения и обвал кровли машинного зала. Из-за разрушения реакторного отделения был выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду. Активный выброс радиоактивных веществ был обусловлен высокой температурой горящего топлива внутри реактора, что привело к испарению и возгонке радиоактивных продуктов из реакторной установки [10].

Также примером может послужить пожар на Белоярской АЭС. 31 декабря 1978 г. в районе турбогенератора 2 произошло возгорание турбинного масла, силовых и контрольных кабелей. До прибытия пожарных подразделений произошло обрушение конструкций покрытия над машинным залом на площади около 960 м² (рисунок 1.15).

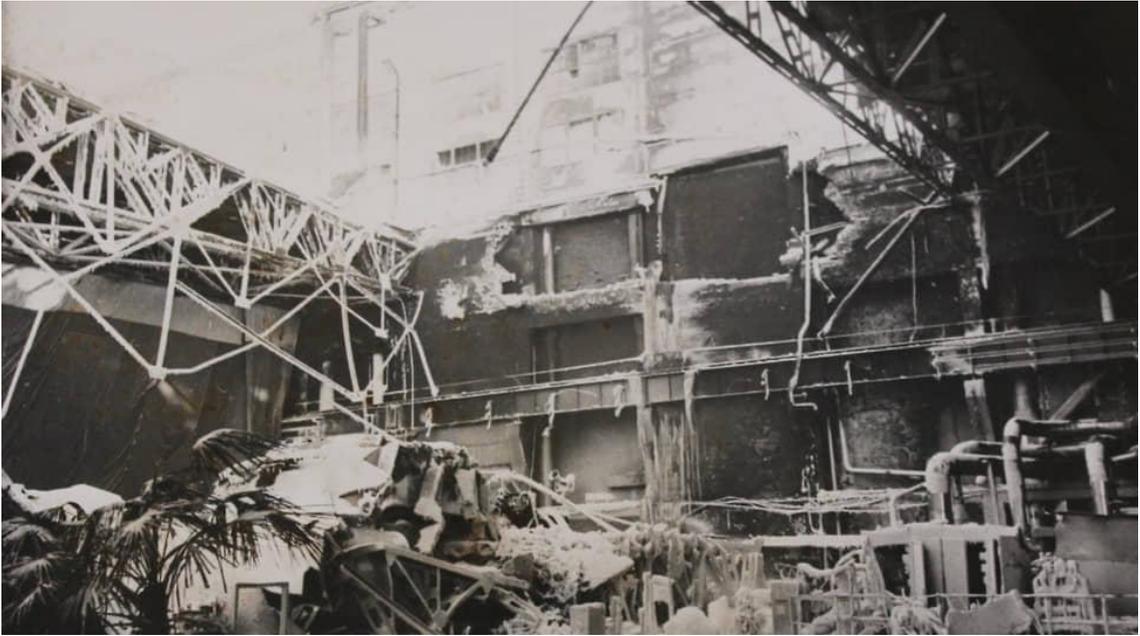


Рисунок 1.15 – Обрушение крыши машинного зала Белоярской АЭС [10]

В 1982 г. произошел взрыв генератора на Армянской АЭС (г. Медзамор, СССР), после взрыва был пожар на площади 300 м², с уничтожением всего оборудования.

В 1984 г. на АЭС Ранчо Секо (США) произошел пожар с выбросом и взрывом водорода в системе охлаждения турбогенератора.

На АЭС Flamanville (Франция) 9 февраля 2017 года произошел взрыв в машинном зале третьего энергоблока станции, перешедший в пожар. Причиной взрыва стало короткое замыкание в электросети. В результате пожара производство электроэнергии из реактора было остановлено.

В г. Улан-Удэ (Россия) 9 февраля 2008 г. загорелась турбина ТЭЦ-1. Причиной пожара стало возгорание электрического кабеля. Площадь пожара составила 1000 м², при горении 17 тонн масла произошло частичное обрушение кровли над турбиной (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Последствия пожара в машинном зале ТЭЦ-1, г. Улан-Удэ [10]:
слева – последствия обрушения; *справа* – машинный зал сразу после ликвидации пожара

5 ноября 2014 г. на Томской ГРЭС (Россия) произошел пожар из-за возгорания силового щита. В данном случае, пожар удалось локализовать на площади 50 м².

4 января 2015 г. на Сургутской ГРЭС-2 произошел пожар на площади 1300 м² с обрушением двух пролетов кровли машинного зала (рисунок 1.17). Пожар на Сургутской ГРЭС-2 произошел из-за возгорания масла в турбинном отделении.



Рисунок 1.17 – Обрушение двух пролетов кровли турбинного отделения энергоблока Сургутской ГРЭС-2 [10]

07 декабря 2015 г. на Василеостровской ТЭЦ в г. Санкт-Петербурге произошел пожар в машинном зале. Площадь пожара составила 400 м². Причиной пожара также стала разгерметизации маслосистемы четвертой турбины и отрыв одной из подающих трубок. Столб огня от разлива масла достигал высоты 30 м, и также произошло обрушение кровли машинного зала.

Вышеуказанные примеры говорят о том, что основными причинами пожаров являются короткие замыкания и перегрузки, нарушения правил пожарной безопасности при проведении огневых работ, неисправность и нарушение правил эксплуатации технологического оборудования, а также неосторожное обращение с огнем. При этом, практически во всех приведенных примерах происходило обрушение кровель машинных залов, то есть тех разрушений, которые требуют больших временных и финансовых затрат на восстановление.

1.2 Специфика возникновения и развития пожаров в машинных залах электростанций

Принимая во внимание, что машинный зал от подвала до кровли является единой пожарной зоной, в нем можно выделить две наиболее пожароопасные зоны, в которых имеются следующие источники пожара:

- первая зона – легко воспламеняющиеся материалы – турбинное масло, водород;
- вторая зона – горючие материалы электрооборудования – изоляция кабелей, электродвигателей и т. п.

В первой зоне расположено оборудование маслосистем турбины и генератора, а также генератор. В этой зоне протяженность маслопроводов и газопроводов значительна, поэтому она является самой пожароопасной.

Во второй зоне расположена этажерка помещений электротехнических устройств, в т. ч. помещения распределительных устройств собственных нужд

(далее – РУСН), помещение щита постоянного тока (далее – ЩПТ) и агрегата бесперебойного питания (далее – АБП), помещение сборок задвижек.

В обеих зонах имеются кабельные трассы, в которых проходят силовые и контрольные кабели, обеспечивающие электропитание механизмов собственных нужд и арматуры, а также функции управления. Пожар в кабельных трассах также приводит к тем же событиям, что и при пожаре в помещениях электротехнических устройств, а также к потере функций ряда систем автоматики и управления.

Динамика развития пожаров в машинных залах обусловлена их быстрым развитием из-за наличия большого количества материалов и горючих газов (турбинного масла, оболочек и изоляции электрических кабелей, сгораемого утеплителя и изоляции кровли, водорода и т. п.), а также опасными факторами, затрудняющими работу пожарных. К этим факторам относятся:

- тепловое излучение от факела пламени, затрудняющее приближение пожарных к очагу горения для эффективного осуществления тактических действий;

- интенсивное задымление помещений токсичными продуктами горения, которые могут заполнять верхнюю часть залов отметок обслуживания турбогенераторов за 5–7 мин.

Если анализировать развитие пожара в машинном зале АЭС, то можно сделать вывод, что наиболее интенсивно пожар развивается после взрыва (турбины, водорода, паров в масляных емкостях и т.п.).

В результате взрыва возникает опасность выхода водорода из системы охлаждения или пара с температурой 5000°С. Также последствия взрыва приводят к растеканию масла, образованию коротких замыканий на линиях оперативного тока, контрольных и силовых кабелей. Самый главный ущерб от взрыва может привести к обрушению ограждающих конструкций зданий.

В ряде случаев первичные очаги горения возникали в машинных залах вследствие аварии маслосистем и самовоспламенения масла при попадании на горячие поверхности цилиндров высокого и среднего давления (ЦВД; ЦСД)

турбины и паропроводов. При разгерметизации маслопровода и подшипника ЦНД и генератора, в данном случае источником зажигания будет любая искра и водород. При этом обстановка быстро усложняется в связи с тем, что горячее масло через неплотности и проемы растекается на нижерасположенные отметки (кабельные каналы, туннели), где под воздействием пламени оказывается горючая изоляция кабельных трасс, емкостное оборудование и маслопроводы.

При данном сценарии развития наблюдается выделение дыма, что мешает персоналу выполнять действия по аварийному плану обеспечения непрерывной работы других устройств. При возгорании масла сложность заключается в том, что емкости маслосистем, маслопроводы и насосы находятся на минусовом уровне машинного зала, когда горение будет происходить на отметке ниже, чем расположение генератора, при этом турбины, все приборы контроля и управления расположены выше, то есть там, где находится дым и огонь. Проведенные исследования показывают, что сгорание всего 8 кг турбинного масла в типичном машинном зале приводит к снижению видимости до 3 м на высотах свыше 7,4 м [33].

Анализ нарушений в работе, первопричиной которых была утечка масла с последующим его возгоранием, показал, что катастрофические последствия наступали примерно в 17 % случаев [52].

Анализ характерных вариантов сценария аварийной ситуации с проливом и возгоранием масла (факельное горение фонтанирующей струи масла и горение масла, разлившегося на площадке обслуживания турбоагрегата), а также сценариев аварийных ситуаций, связанных с утечкой и возгоранием водорода, т. е. пожаров классов В и С, позволил определить расчетные значения временных и пространственных характеристик очагов пожара при разгерметизации маслосистемы турбоагрегата и системы водородного охлаждения генератора.

Так, при пожарах маслосистем площадь пожара зависит от степени и места повреждения системы. Максимальная скорость роста площади горения на имевших место пожарах достигала $25 \text{ м}^2/\text{мин}$ [52].

Согласно расчетным оценкам ФГБУ ВНИИПО МЧС России [63], горение турбинного масла на поверхности площадью более 50 м^2 приводит к перегреву кровли машинного зала. При горении данных площадей время разогрева несущих ферм покрытия до критической температуры ($500 \text{ }^\circ\text{C}$) в отдельных случаях составляет до 5 мин.

При этом стоит отметить, что наибольшую угрозу для ферм перекрытия машинного зала представляет фонтанирующее горение масла более 1 минуты. Факелы горящего масла быстро нагревают элементы металлических ферм и соединений до критической температуры, что может привести к обрушению ферм и перекрытий кровли.

Основной причиной развития и наступления тяжелых последствий пожаров в машинных залах при горении масла является, как правило, воздействие температурных полей «конвективной колонки», образуемой над очагом пожара на несущие конструкции и элементы здания [64]. Так, поля абсолютной температуры вверху «конвективной колонки» через 240 с (6 мин) после начала пожара в машинном зале АЭС при горении пролива масла из системы смазки подшипников на площади 250 м^2 составляют от 650 до $850 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 1.18).

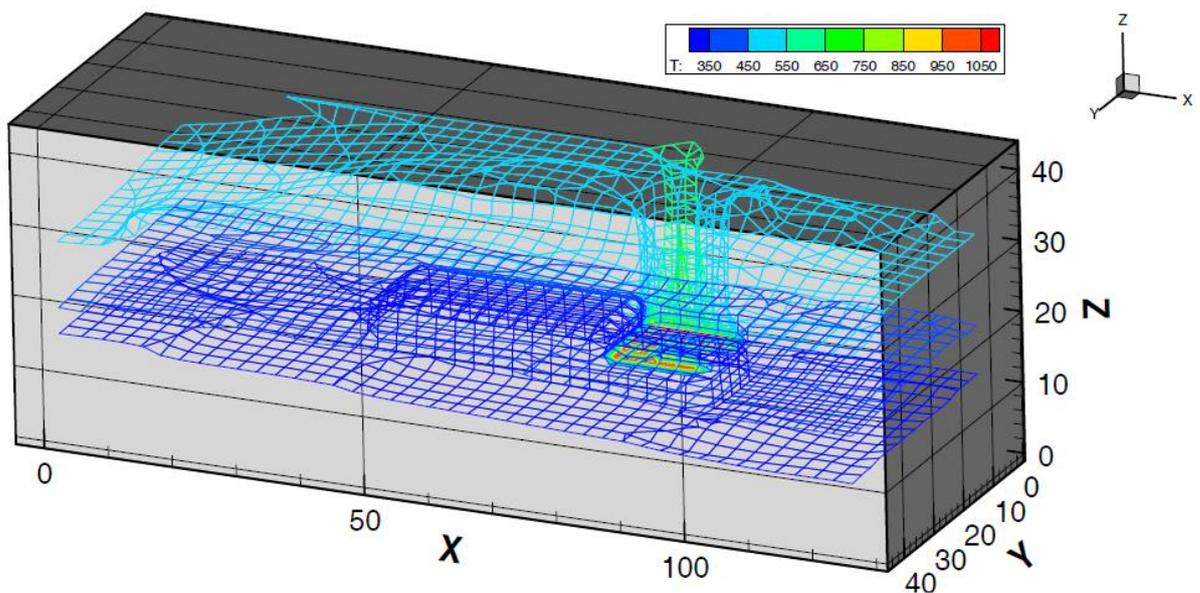


Рисунок 1.18 – Образование и температурные поля «конвективной колонки» при пожаре в машинном зале АЭС на 6-й мин [64]

Воспламенение масла и пожар в этой зоне с последующим немедленным остановом турбоагрегата может вызвать ряд событий, которые могут привести к каскадному катастрофическому развитию аварийной ситуации, в том числе:

- не посадка стопорных клапанов турбины;
- повышение частоты вращения ротора;
- понижение давления масла в напорном коллекторе системы смазки подшипников;
- повышение давления в паровом пространстве в любом из конденсаторов турбины;
- отключение любых двух циркуляционных насосов турбины;
- осевой сдвиг ротора турбины;
- понижение перепада давления «масло-водород» и, соответственно, понижение уровня масла в любом из демпферных баков системы уплотнений вала генератора;
- прекращение протока охлаждающей воды через статор генератора;
- недопустимое снижение расхода охлаждающей воды на газоохладители;
- понижение давления масла в системе регулирования турбины;
- несоответствие стопорных и регулирующих клапанов турбины.

Обычно разрушение турбины приводит к выбросу большого количества масла, сопровождается выбросом водорода и возникновением пожара, который по классификационным параметрам можно отнести к самой высокой категории взрывопожарной и пожарной опасности. В машинном зале аварийная ситуация может развиваться по двум граничным сценариям: «взрыв-пожар» или «пожар-взрыв». В случае развития первого сценария, горение масла приводит к образованию высокотемпературного факела. В случае развития второго сценария, наиболее вероятной причиной взрыва будет являться накопление водорода в верхней части машинного зала при утечке. При этом стоит отметить, что как в первом, так и во втором сценариях тепловые потоки горящего масла представляют серьезную угрозу для целостности и несущей способности металлоконструкций, стропильных ферм кровли и колонн машинного зала.

При достижении критической температуры незащищенных металлоконструкций (500°C), следовательно, и их обрушение, может произойти в течение минуты. [55].

В 1993 году ВНИИПО МВД России выполнил исследовательскую работу по заказу Госкоматома Украины на тему «Методы защиты несущих конструкций машзалов от опасных факторов пожара» [65]. Результаты этого исследования показали, что при разрушении уплотнения генератора, горящая смесь водорода и масла проникает в машзал и нагревает металлические фермы до 500°C в течение 25–30 с, если конструкция не покрыта огнезащитным составом. При наличии 2,0 мм слоя огнезащитного состава, этот процесс занимает 120 с, а температура в ядре горящего водородного факела достигает 2000°C . Это фактически произошло, как на блоке 2 Чернобыльской АЭС в 1991 г., так и на некоторых ТЭС. Следовательно, при аварийных ситуациях, связанных с пожарами газомасляной системы, и прежде всего с разрушением уплотнения генератора и факельным горением водородно-масляной смеси, за указанный выше интервал времени нагрева металлоконструкций до критической температуры крайне затруднительно, а иной раз практически невозможно, привести в действие установки пожаротушения и противоаварийные средства, предусмотренные проектом для действующих машинных залов АЭС в настоящее время.

Опытным путем ФГБУ ВНИИПО МЧС России установлено, что при горении турбинного масла на площади 5 м^2 снижение видимости до 1 м происходит в течение 5 мин. Через 0,5–1 мин после возникновения пожара превышаются предельно допустимые концентрации токсичных веществ в местах пребывания персонала. Видимость снижается до допустимого предела в течение 1,5–3,5 мин. Температура повышается до опасных значений за 6–8 мин с одновременным полным задымлением машинного зала объемом более 8000 м^3 [66].

В начале пожара горение происходит на ограниченной площади и имеет место «локальный пожар», который характеризуется неоднородным распределением температуры в объеме помещения [63]. Основная масса

высокотемпературных продуктов горения содержится в конвективной колонке и поднимается к потолку.

Вышеуказанные факты говорят о трудности тушения пожаров машинных залов электростанций в случае их возникновения. Исходя из этого, далее в работе рассмотрены существующие технологии тушения пожаров на атомных электростанциях.

1.3 Существующие технологии применения ствольной техники для защиты машинных залов электростанций

Первоначальные действия по локализации пожаров на АЭС, как правило, выполняет оперативный персонал, а после прибытия подразделений пожарной охраны, сотрудники федеральной противопожарной службы (далее – ФПС) (рисунок 1.19).



Рисунок 1.19 – Тушение пожаров машзалов подразделениями ФПС [60]

Меры по применению первичных средств пожаротушения должны быть приняты персоналом в начальной стадии развития пожара. При этом тушение может быть эффективным и безопасным при условии наличия и применения персоналом АЭС специальной экипировки и средств индивидуальной защиты от воздействия опасных факторов пожара. Кроме того, до прибытия пожарных

подразделений оперативный персонал АЭС, согласно действующим инструкциям обязан провести необходимые технологические переключения (отключения), а при угрозе ядерной аварии, вывод реакторной установки в подкритичное состояние.

Тушение крупных пожаров на АЭС с применением основной и специальной пожарной техники, как правило, связано с определенным временем на прибытие пожарных подразделений к месту пожара (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Время прибытия подразделений ФПС по охране АЭС к месту вызова по результатам проведения хронометража в соответствии с письмом ГК «Росатом» от 23.06.2016 №1-1.4/24305

АЭС	Место условного пожара	Время прибытия, мин
Балаковская	Через КПП 5	3 мин 50 с
Белоярская	Энергоблок № 4	4 мин 50 с
Билибинская	Через КПП 2 (ворота №3)	4 мин 46 с
Калининская	Через КПП 2	3 мин 50 с
Кольская	Через КПП 2	4 мин
Курская	Через КПП 1	4 мин
Ленинградская	Через КПП 7	2 мин 15 с
Нововоронежская	Через КПП 1	4 мин
Ростовская	Через КПП 3	4 мин
Смоленская	Центральное КПП	1 мин 16 с
Средний показатель времени прибытия подразделений ФПС на АЭС без учета времени начала эффективных действий		3 мин 40 с

Следует учитывать, что эффективные действия подразделений ФПС на АЭС с учетом времени получения сообщения, сбора, выезда и прибытия на пожар, разведки и боевого развертывания без получения допуска на тушение электроустановок начинаются в среднем через 10–15 мин [60, 67–69].

За время 10–15 мин пожар в машинном зале может принять значительные размеры, что приведет к образованию конвективной колонки, что, в свою очередь приведет к потере несущей способности ферм перекрытия во временных

показателях 10–15 мин. При данном факте на практике имеют место случаи несвоевременного сообщения о пожаре в подразделения ФПС (таблица 1.3) [60].

Информация по отдельным случаям фактического реагирования подразделений ФПС по охране АЭС на пожары представлена в таблице 1.4 [60].

Таблица 1.4 – Фактическое время реагирования подразделений ФПС по охране АЭС на пожары

АЭС	Подразделение ФПС	Выезды на пожар АЭС	Дата	Расстояние от ПЧ до КПП, км	Время следования, мин	Причина позднего прибытия
БелАЭС	СПСЧ-35	Крыша деаэрационной этажерки реактора БН-600	27.06.2013	1	35	Сообщение в СПСЧ через 25мин с момента обнаружения
КуАЭС	СПСЧ	Силовая сборка 17001Н КРУ 0,4кВ пом. № 103/1 блока ВСРО [9]	20.03.2014	0,8	20	Сообщение в СПСЧ через 6 минут момента обнаружения
РСТАЭС	СПСЧ-37	Открытая площадка ресиверов водорода, азота	09.02.2015	0,2	16	Сообщение в СПСЧ через 7 мин с момента обнаружения
КЛНАЭС	СПСЧ-8	Фаза «В» шунтирующего реактора Р-1-750	23.07.2010	0,5	4	–

Проведенный анализ показал, что задержка в обнаружении пожара, несвоевременный вызов пожарных подразделений и задержка срабатывания автоматических средств пропуска на территорию АЭС приводят к увеличению времени прибытия пожарных подразделений от 2 до 35 мин [4, 5]. Эти данные были получены из таблицы 1.4, которая отражает следование объектовых подразделений ФПС ГПС по охране АЭС к месту вызова, то есть к пожару, на территории АЭС [60].

Не следует исключать риски негативного влияния человеческого фактора на развитие пожаров при несвоевременном сообщении в подразделения пожарной охраны.

С учетом вышеизложенного можно сделать вывод, что обеспечение мер, направленных на минимизацию рисков возникновения пожаров и надежную противопожарную защиту до прибытия сил и средств пожарной охраны, является важнейшим условием для безопасной эксплуатации АЭС.

При этом стоит отметить, что при формировании технических решений по обеспечению пожарной безопасности машинных залов возможно применение других способов защиты металлических конструкций от высоких температур пожара, в частности использование дренчерных или спринклерных установок пожаротушения или нанесение огнезащитных покрытий.

Например, противопожарная защита маслобаков турбоагрегатов и питательных насосов осуществляется установками, использующими в качестве огнетушащего вещества распыленную воду с интенсивностью подачи воды, принятой из расчета $0,2 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ площади боковых стенок и верха бака.

Спринклерные оросители предназначены для автоматического включения систем пожаротушения при достижении температуры окружающей среды в защищаемых помещениях равной номинальной температуре срабатывания.

При этом стоит отметить, что у спринклерных и дренчерных установок есть ряд недостатков:

- негативно сказывается на несущей способности ферм покрытия крепление трубопроводов с огнетушащим веществом;
- обслуживание спринклерных и дренчерных установок требует больших трудозатрат;
- установка спринклерных и дренчерных установок на уже построенных энергоблоках невозможна, так как это может вызвать перегрузку ферм;
- при интенсивном нагревании трубопроводов спринклерных установок может возникнуть образование пара в трубе с последующим разрывом трубопровода.

Применяемые огнезащитные составы в машинных залах АЭС могут повысить предел огнестойкости металлоконструкций ферм до 45 минут. Но стоит отметить повышение весовой нагрузки огнетушащих покрытий на поверхность ферм. Кроме того, нанесение огнезащитного покрытия на фермы перекрытия машинного зала в уже построенных объектах является сложной задачей и может не обеспечить необходимый уровень качества покрытия.

На основе изложенного следует сделать вывод о том, что в условиях уже эксплуатируемых электростанций наиболее приемлемым способом защиты

металлических ферм машинных залов является охлаждение струями, подаваемыми из лафетных стволов.

В [60] указано, что для орошения металлических конструкций машинного зала, при соответствующем обосновании, могут быть использованы лафетные стволы (схема расположения лафетных стволов указана на рисунке 1.20), стволы (устройства) водопенные распыливающие и дренчерные установки водяного орошения [70]. Интенсивность орошения металлоконструкций должна составлять не менее $0,06 \text{ л/см}^2$.

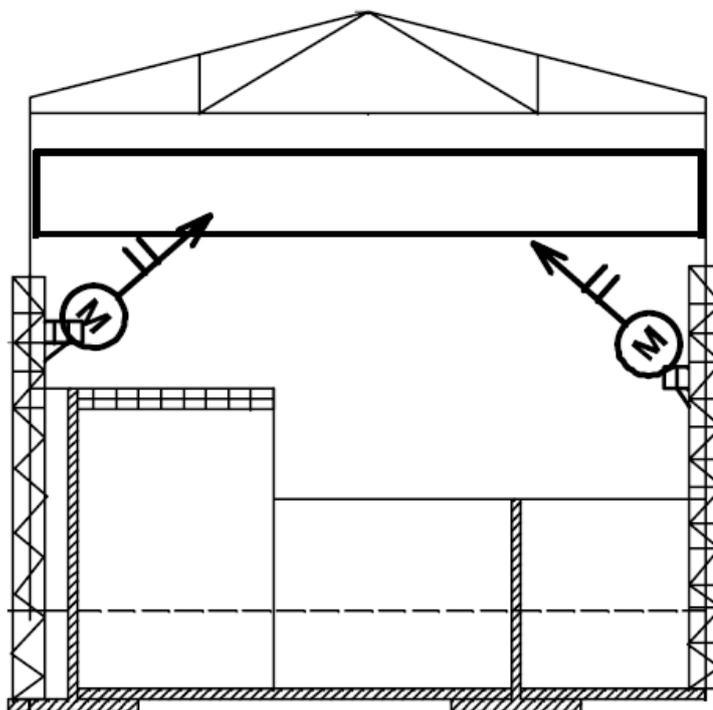


Рисунок 1.20 – Схема расстановки ствольной пожарной техники в машинном зале [15]

Стационарные лафетные стволы с ручным управлением, установленные в машинных залах электростанций, могут быть трудны в управлении. Эти трудности обусловлены следующим:

- управление лафетными стволами требует, чтобы оператор управлял стволом в условиях, где присутствует открытый огонь, повышенная температура, токсичные продукты горения, а также присутствует возможность обрушения конструкции и взрыва;

- использование лафетных стволов с ручным управлением не может обеспечить точность попадания струй на фермы перекрытия машинного зала. Это

связано с тем, что наведение происходит визуально в условиях сильного задымления от горящего разлива масла;

– из-за высокой вероятности обрушения ферм перекрытия, подача охлаждающих струй воды должна начинаться сразу после обнаружения пожара. Однако дежурный персонал машинного зала, при обнаружении пожара, должен выполнить ряд действий по защите оборудования и не может одновременно управлять несколькими лафетными стволами вручную;

– управление ручными лафетными стволами требует задействования пожарных, участвующих в тушении и проведении аварийно-спасательных работ.

Практически на любом крупном пожаре, а особенно при пожарах в машинных залах применяются пожарные лафетные стволы, как переносные от мобильной пожарной техники, так и стационарные от систем пожаротушения объекта защиты. Как раз стационарные лафетные стволы, не зависимо от вида управления, которые подключены к системе противопожарного водоснабжения и установлены в наиболее пожароопасных местах, во много раз сокращают время готовности к пожаротушению боевыми подразделениями пожарной охраны, так как уже до их прибытия обеспечивают нормативную интенсивность подачи ОТВ и охлаждение технологического оборудования и строительных конструкций.

При проектировании систем противопожарной защиты машинных залов электростанций на базе лафетных стволов опираются на следующие нормативные документы:

– СП 485.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования»;

– СНиП II-58-75 «Электростанции тепловые»;

– НПБ 114-2002 «Противопожарная защита атомных станций. Нормы проектирования»;

– ГОСТ Р 51115-97 «Техника пожарная. Стволы пожарные лафетные. Общие технические требования. Методы испытаний»;

– ГОСТ Р 53326-2009 «Техника пожарная. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний»;

– ГОСТ Р 59636-2021 «Установки пожаротушения автоматические. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность».

Вышеуказанные нормативные документы имеют обширный спектр требований для обеспечения пожарной безопасности, в том числе и требования по технологии расстановки пожарных лафетных стволов. Учитывая требования данных документов, как постулатов обеспечения пожарной безопасности на объектах энергетики разрабатывают собственные стандарты организаций (далее – СТО), которые заверяются в уполномоченных подразделениях МЧС России. Принятые СТО регламентируют в том числе и расстановку пожарных лафетных стволов в машинных залах электростанций. Анализ СТО различных организаций показал, что требования в области расстановки ствольной пожарной техники сводится к общим требованиям, а именно:

- все защищаемое пространство должно быть в радиусе действия не менее 2-х струй лафетного ствола;

- нормативная интенсивность орошения огнетушащим веществом для тушения должна быть не менее чем требование таблицы 6.1 нормативного документа [55], а для охлаждения ферм машинного зала, данное значение должно быть не менее $0,6 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$;

- при пожаре на данных объектах требуется не только тушение, но и охлаждение не горящих технологических установок, при расстановке стволов;

- при расстановке стволов требуется учитывать баллистику струи огнетушащих веществ для обеспечения подачи ОТВ на всю защищаемую и охлаждаемую площадь;

- при подаче ОТВ в виде воздушно-механической пены требуется разработка воздушно-пенных насадков, которые обеспечивают образование воздушно-механической пены требуемой кратности.

На сегодняшний день ствольная пожарная техника является одним из основных средств борьбы с пожарами, в том числе и на объектах энергетического комплекса. Данное средство пожаротушения стоит на вооружении пожарных

частей или входит в систему обеспечения пожарной безопасности объекта защиты. Ствольная пожарная техника включает в себя пожарные лафетные стволы, которые могут быть дистанционно-управляемыми, роботизированными или с ручным управлением [71].

Основным назначением пожарных стволов является эффективная удаленная и точечная подача огнетушащего вещества на очаг возгорания, что позволяет производить пожаротушение на расстоянии от огневого фронта в пределах радиуса действия струи ОТВ [15].

Диапазон расходов для ручных пожарных стволов составляет от 1 до 16 л/с, для стационарных лафетных стволов – от 16 до 400 л/с и более. То есть лафетные стволы способны за час подавать в зону горения до 1,5 тыс м³ воды, что равноценно 300 пожарным автоцистернам с емкостью бака для огнетушащих веществ 5000 л.

Значительные расходы требуют создавать высокое давление, тем самым вызывая значительную реактивную силу реакции струи. Данный факт делает необходимым применение опорных приспособлений или лафетов, поэтому и название «лафетные стволы».

Лафетные стволы должны обеспечивать возможность подачи ОТВ с требуемым расходом и рабочими давлениями, необходимыми для тушения пожара, в соответствии с тактикой тушения пожаров или с требованиями нормативных документов. Кроме этого, лафетные стволы должны обеспечивать эффективную дальность подачи и интенсивность орошения, исходя из показателей требуемой интенсивности подачи для горючей нагрузки [72, 73].

Лафетные стволы по виду формирования струи могут быть с образованием сплошной струи и с образованием струи с разными углами факела распыла. Сплошная струя у лафетных стволов формируется благодаря конусному насадку. Пенные сплошные струи формируются с использованием пенного насадка, который может дополнительно устанавливаться как на конусный, так и на универсальные насадки. Как правило, для изменения расхода у таких стволов применяются насадки с другим поперечным диаметром (рисунок 1.21).



Рисунок 1.21 – Конусный насадок пожарного ствола ЛС-20 [15]

На ближних расстояниях, ввиду сильного гидромеханического воздействия, применение сплошных струй малоэффективно. Пожарные лафетные стволы и ручные с коническим насадком (таблица 1.5, см. рисунок 1.21), формирующим сплошную струю, имеют ограниченные возможности тушения и устаревшую конструкцию и поэтому в настоящее время применение их малоэффективно.

Таблица 1.5 – Технические характеристики лафетных стволов с конусными насадками

Показатель	Лафетный ствол				
	СЛК – С20	СЛК – П20	ЛС – С20	ЛС – С40	ЛС – С60
Общий вид					
Рабочее давление, МПа	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8
Номинальный расход, л/с:	20	20	20	40	60
воды	20	20	20	40	60
раствора пенообразователя					
Дальность струи при номинальном расходе, м:					
вода	55	55	60	70	75
пена	40	40	40	40	40
Диаметр насадка, мм	28(25;32;38)	28(25;32;38)	28	38	50
Кратность пены	6	6	6	6	6
Перемещение ствола в плоскости, град:					
горизонтальной	360	360	360	360	360
вертикальной	+75 – -15 °	+75 – -15 °	+75 – -15 °	+75 – -15 °	+75 – -15 °
Габаритные размеры, мм:					
длина	1200	1200	1500	1450	1950
ширина	330	330	500	500	550
высота	300	300	380	380	450
Тип присоединения	Фланец Ду 65	Головки ГМ 80×2	Фланец Ду 80	Фланец Ду 80	Фланец Ду 100
Усилие на рукоятке, кгс	14	14	14	14	14
Масса, кг	14	16,5	30	30	30

Сегодня в реальных боевых действиях по тушению пожаров себя зарекомендовали пожарные лафетные стволы с универсальным насадком (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Технические характеристики лафетных стволов с универсальными насадками

Показатель	Лафетный ствол				
	PROTECT OR-RU	MOONSON RC-Ru	FJM-80	COMBITO R GP 3000	MONITOR-INOX GP 7000
Общий вид					
Рабочее давление, МПа	0,45–0,83	0,55–0,83	1,6	1,6	1,6
Номинальный расход воды, л/с:	20	20	20	40	60
Дальность струи при номинальном расходе, м:	вода	70	85	70	80
	пена	63	-	63	65
Кратность пены	6	6	6	6	6
Перемещение ствола в плоскости, град:	горизонтальной	360	360	360	360
	вертикальной	90° – -45 °	90° – -45 °	90° – -45 °	90° – -45 °

Данный насадок позволяет формировать широкий спектр: по виду ОТВ, т. е. водяных и пенных, по геометрии струи – сплошные и с разным углом факела распыла, по дисперсному состоянию ОТВ (сплошная струя, распыленная). Также универсальный насадок обеспечивает возможность регулировать расход без перекрытия самого ствола. Ствольная техника с универсальным насадком отлично зарекомендовала себя при тушении пожаров, но возможности данного вида противопожарной защиты не изучены и научно не обоснованы, ее разработка ведется, опираясь на результаты эмпирических испытаний производителей. Не обоснована технология размещения лафетных стволов на объекте защиты в виде стационарных установок пожаротушения.

Так, множественное применение ствольной пожарной техники с универсальным насадком показывает, что дальность подачи ОТВ у стволов с универсальным насадком больше, чем у стволов с конусным насадком при одинаковых показателях давления перед стволами, т. е. предварительно можно

утверждать, что универсальный насадок формирует скоростной поток со значением скорости выше, чем в конусных насадках.

Пожарные лафетные стволы, указанные в таблице 1.6, могут формировать сплошные и распыленные струи, изменять угол факела распыла струи в широких диапазонах.

Стационарный лафетный ствол с ручным управлением PROTECTOR-RU производства компании TFT (США) предназначен для установки на пожароопасных объектах, в том числе и в машинных залах. Имеет разнообразные функциональные возможности подачи огнетушащих веществ, кроме этого, оборудован ручным клапаном для предотвращения гидроудара.

Стационарный лафетный ствол MOONSON RC-RU (США), также производства компании TFT, имеет возможность дистанционного управления. Из-за небольших габаритных размеров и конструктивного исполнения обеспечивает малые потери напора на стволе.

Стационарный лафетный ствол FJM-80 фирмы Skum (Швеция) имеет простую конструкцию, но данное конструктивное исполнение обеспечивает высокие показатели потери напора на стволе.

Переносной лафетный ствол COMBITOR GP3000 и стационарный лафетный ствол MONITOR-INOX GP 7000 фирмы r.Pons (Франция) укомплектованы водопенными насадками с регулируемым расходом, а также формируют разный угол факела распыла струи воды и воздушно-механической пены.

В Российской Федерации лафетные стволы с универсальным насадком производятся в соответствии с ГОСТ Р 51115–97 «Техника пожарная. Стволы пожарные лафетные. Общие технические условия. Методы испытаний» и ГОСТ 53331–2009 «Техника пожарная. Стволы пожарные ручные. Общие технические требования. Методы испытаний». В данных нормативных документах дана широкая номенклатура лафетных стволов в различном исполнении: стационарные, переносные, с ручным и дистанционным управлением, роботизированные, в морском и взрывозащищенном исполнении, с эжектором, с

дефлектором. Но стоит отметить, что в данный широкий спектр не входят стволы с осциллирующим устройством.

В универсальном насадке (рисунок 1.22), самую главную роль играет дефлектор (2) – это тарельчатый диск, который располагается непосредственно после поперечного сечения трубопровода ствола (1), на определенном расстоянии (образуя кольцевой щелевой зазор), через который огнетушащее вещество может выходить из ствола в разные стороны, с углом факела распыла струи до 120° и более (4). Далее, с помощью внешнего регулятора (бампера), геометрия струи регулируется до требуемого угла распыла.

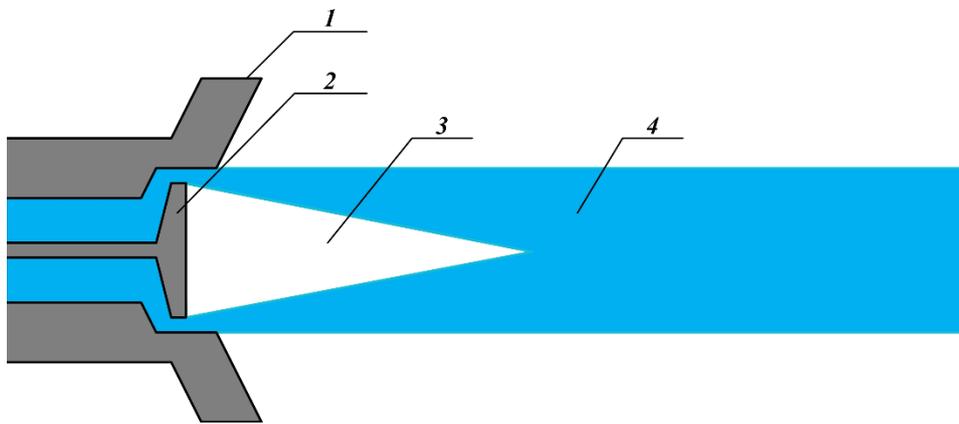


Рисунок 1.22 – Схема формирования струи на выходе из универсального насадка:

1 – насадок; 2 – дефлектор; 3 – зона разряжения; 4 – струя ОТВ

Из универсального насадка вода выходит с одинаковой скоростью на всех участках разреза струи, в отличие от сплошной струи, выходящей из конусного насадка, где она имеет значительно большую скорость в центре, чем по краям, и уже на выходе имеет тенденцию к распаду. Вакуум, создаваемый внутри прямой распыляющей струи, фокусирует струю к центру после прохождения небольшого расстояния от насадка (рисунок 1.22) и равномерно заполняет весь внутренний объем капельной массой [39].

Сплошная струя, сформированная универсальным насадком, имеет одинаковую скорость в разрезе, она получается тугой и стабильной, по дальности данная сплошная струя превосходит струю, получаемую из конусного насадка [39]. При этом данная струя состоит не из сплошного, близкого к ламинарному, потока жидкости, а из капельной массы. Данная масса эффективнее

поглощает тепловую энергию из-за многократно увеличившейся площади контактной поверхности.

Конструкция универсального насадка обеспечивает формирование пены низкой кратности. При выходе из насадка пена формируется уже в полете при контакте потока распыленной массы раствора пенообразователя с воздухом. В результате дальность подачи будет значительно выше, чем у стволов, формирующих воздушно-механическую пену низкой кратности, в которых пена формируется непосредственно в стволе.

Все вышеуказанные факторы говорят о преимуществах ствольной техники с универсальным насадком, но научно не изучена и не обоснована баллистика струи, формируемая универсальным насадком.

При применении ствольной техники и дальнейшем расчете сил средств, требуется знать ряд физических показателей, такие как коэффициент местного сопротивления в полости насадка перед дефлектором, и как следствие расход ствола с универсальным насадком.

Процесс выхода огнетушащего вещества (в большинстве случаев жидкости), есть не что иное, как процесс истечения жидкости в атмосферу. В процессе такого истечения запас потенциальной энергии, которым обладает жидкость, на взлете превращается в кинетическую энергию струи в свободном падении [35]. До ввода в эксплуатацию эмпирически разработанных универсальных насадков, было подробно исследовано истечение жидкости из насадков различных форм, образованных геометрическими фигурами вращения [35, 74].

При многократных исследованиях и эмпирических испытаниях было выявлено, что на расход при истечении жидкости из насадков влияет: форма и площадь поперечного сечения выходного отверстия (S), коэффициент местного сопротивления (ζ), коэффициент сжатия (ϵ). Выявлено, что наилучшей формой выходного отверстия является круглое отверстие (рисунок 1.23).

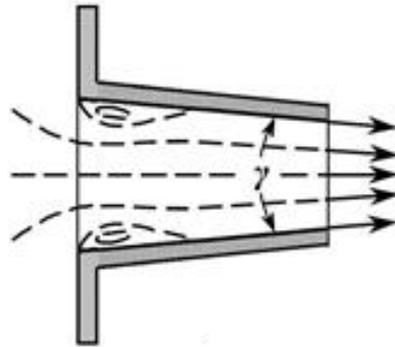


Рисунок 1.23 – Схема выхода жидкости из конусного насадка

Степень сжатия оценивается коэффициентом сжатия (ε):

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_o} = \left(\frac{d_c}{d_o}\right)^2, \quad (1.1)$$

где S_c и S_o – площадь поперечного сечения струи и отверстия; d_c и d_o – диаметр поперечного сечения струи и отверстия.

Скорость истечения жидкости через круглое отверстие:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (1.2)$$

где φ – коэффициент скорости;

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}, \quad (1.3)$$

где α – коэффициент Кориолиса (равен 1); ζ – коэффициент местного сопротивления (табличное значение).

Расход жидкости определяется как произведение действительной скорости на фактическую площадь сечения:

$$Q = S_c \cdot v. \quad (1.4)$$

Произведение ε и φ принято обозначать буквой μ и называть коэффициентом расхода, т. е. $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$.

В итоге формула расхода для конусного насадка имеет вид:

$$Q = \mu \cdot S_o \cdot \sqrt{2gH}, \quad (1.5)$$

где H – напор на стволе.

Для стволов с универсальным насадком, имеющим дефлектор, данная формула не применима. Существует установленная специалистами ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР» (далее – ЭФЭР)

зависимость по определению расхода для ствольной техники с универсальным насадком, имеющим дефлектор, и она выглядит следующим образом [15]:

$$Q = k \cdot \pi (R^2 - r^2)(2gH) = 13,9 \cdot k \cdot (R^2 - r^2) \cdot \sqrt{H}, \quad (1.6)$$

где R – радиус корпуса насадка, м; r – радиус дефлектора, м; k – конструктивный коэффициент насадка; H – напор перед насадком, м.

Существует проблема, что данная формула работает только на продукцию компании ЭФЭР. Конструктивный коэффициент насадка k (1.6) не опубликован в технической документации и любой другой научно-технической литературе, и он известен только специалистам ЭФЭР. Данная формула выведена эмпирическим путем и опирается на фундамент аппроксиматических исследований. Кроме этого, формула (1.6) работоспособна при условии, когда дефлектор утоплен в корпусе насадка ствола, тогда как существует ствольная техника с насадками, у которых дефлектор выдвинут впереди самого насадка.

На сегодняшний день пожарные стволы с универсальным насадком могут образовывать разные по своей геометрии струи ОТВ. До начала XX в. для изменения струи ОТВ применялась технология скручивания и накручивания насадков разного диаметра на выходное отверстие пожарного ствола. Но данная технология обеспечивала изменение производительности ствола, путем увеличения или уменьшения диаметра поперечного сечения, снимаемого насадка, а также обеспечивало изменение скоростных показателей потока ОТВ. Также до начала второго десятилетия XXI в., для изменения геометрии струи ОТВ применялись ручные комбинированные пожарные стволы. Данные пожарные стволы обеспечивали изменение геометрии струи благодаря применению шарового крана переключения режима подачи ОТВ из пожарного ствола.

Комбинированные пожарные стволы долгое время являлись основным видом ПТВ в подразделениях пожарной охраны Российской Федерации и зарубежных стран. У комбинированных стволов, несмотря на их широкое распространение в мире существует ряд недостатков. Работа в разных режимах возможна только в полностью открытом положении шарового крана,

соответствующего тому или иному режиму истечения ОТВ. Если не установить клапан в положение, при котором должно происходить то или иное истечение жидкости, то в полости ствола возникают сильные турбулентные процессы (рисунок 1.24), которые разрушают компактную струю или создают не ровную распыленную струю. То есть регулировка расхода ОТВ из ствола путем зажима потока шаровым краном, невозможна, что ограничивает разнообразие действий пожарного на пожаре.

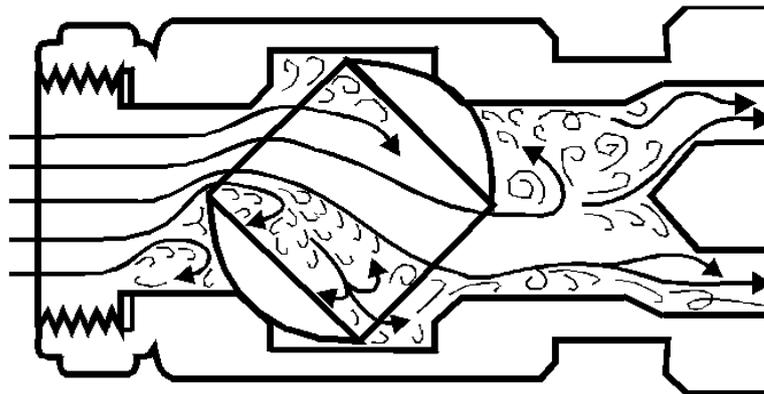


Рисунок 1.24 – Турбулентные завихрения в комбинированном пожарном стволе

Кроме этого, при повышении давления на стволе, шаровый кран становится труднее переключать в разные режимы. Данный вид ствольной техники может образовывать угол факела распыла струи равным 60° . Этот показатель не соответствует занавесной струе ОТВ и не позволяет защищать ствольщики при вспышке или ином тепловом воздействии на них в сложных условиях при тушении пожаров машинных залов. Также данную технологию изменения геометрии струи ствольной техники нельзя применять на лафетных стволах, так как при более высоких показателях напорно-расходных характеристик в полости лафетного ствола будут образовываться кавитационные процессы, что повлечет за собой скоротечный выход из строя лафетного ствола. Также при тушении пожара будет происходить вибрация по всему корпусу лафетного ствола и вследствие чего его неустойчивость.

Все эти факторы позволяют говорить о необходимости получения научно-обоснованных математических зависимостей для определения напорно-расходных характеристик, при истечении ОТВ из универсального насадка.

Можно сделать выводы, что ствольная техника с универсальным насадком уже давно применяется для тушения пожаров машинных залов электростанций. Тактико-технические показатели ствольной техники, разработанные на основе апроксиматических исследований и эмпирическим методом подбора, требуют научного изучения, определения размеров конструкции универсального насадка путем применения дифференциальных уравнений движения жидкости при воздействии на поток этой жидкости разных сил, которые создаются криволинейными поверхностями деталей насадка. Для защиты машзалов проводится расстановка лафетных стволов на защищаемом объекте, исходя из тактических огнетушащих показателей ствольной техники конусного типа, тогда как ствольная техника с универсальным насадком намного функциональнее устаревших образцов, имеет большую площадь эффективного орошения и дальность подачи, которые не изучены. Требуется изучение гидравлических особенностей течения жидкости в универсальных насадках, так как до сих пор отсутствует выведенная теоретически и проверенная практически формула для определения расхода жидкости из универсального насадка, также отсутствуют показатели местного сопротивления универсальных насадков.

Обычно пожарные лафетные стволы устанавливаются на пожарных вышках и имеют дистанционное или роботизированное управление, что позволяет использовать их как пожарных роботов (далее – ПР). Во взрывоопасных зонах лафетные стволы и ПР применяются во взрывозащищенном исполнении. Расстановка лафетных стволов и ПР на защищаемом объекте всегда осуществляется с учетом эффективной дальности струй, при которой достигается наибольшая интенсивность огнетушения – обычно в пределах 70–90 % от максимальной дальности подачи огнетушащего вещества, а для наружных установок – в пределах компактной части струи. При расчете защищаемых зон необходимо учитывать, чтобы каждая точка зоны находилась в радиусе действия двух лафетных стволов или ПР. Однако на сегодняшний день не существует научного обоснования для использования диапазона 70–90 % дальности струй при

составлении карт орошения защищаемого объекта, что вызывает сомнения в применяемых проектировщиками методах [15].

Примером для рассмотрения применения лафетных стволов и ПР для защиты машзала может служить Петрозаводская ТЭЦ (рисунки 1.25, 1.26).

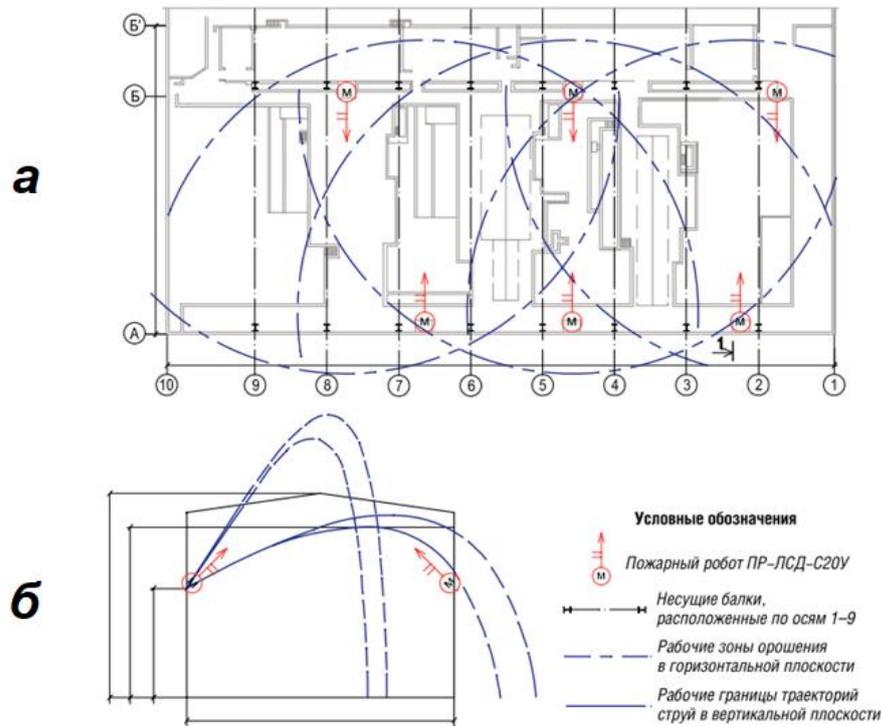


Рисунок 1.25 – Размещение лафетных стволов на Петрозаводской ТЭЦ [15]

a – карта орошения; *б* – эпюра баллистики струи

Покрытие машинного зала Петрозаводской ТЭЦ опирается на 10 ферм длиной 39 м каждая и высотой 3,6 м, установленных с шагом 12 м. В машинном зале, длиной 108 м и шириной 39 м, установлены три турбогенератора по 110 МВт типа Т-100-130. В близости от турбогенератора расположены три маслобака объёмом по 32 м³. Для тушения пожара предусматриваются ПР типа ПР-ЛСД-С20У с общим расходом 120 л/с, работающими в режиме тушения по площади и охлаждения ферм по заранее заданной программе.

Видно, что на сегодняшний день уже есть сформированная технология применения ствольной пожарной техники, которая показана и расписана выше на примере Петрозаводской ТЭЦ. Но опять же, стоит отметить, что данная технология основана на тактико-технических показателях ствольной пожарной

техники с конусным насадком, тогда как универсальный насадок более многофункционален.

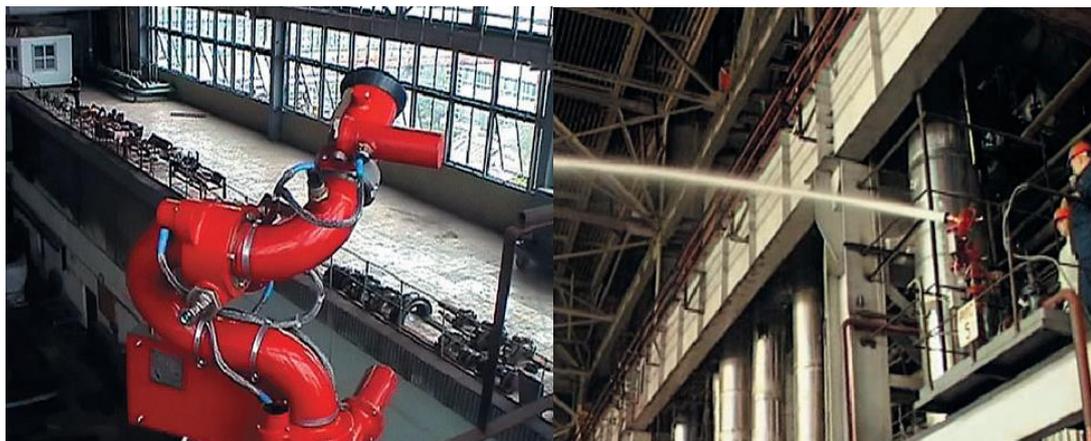


Рисунок 1.26 – Лафетные стволы на Петрозаводской ТЭЦ [15]:

слева — лафетный ствол в дежурном режиме, *справа* — тушение лафетным стволом

Для работоспособности данной системы применялись аппроксимационные методы исследования ствольной пожарной техники, т. е. на основе эмпирических опытов и в рамках требований нормативных документов [72]. В частности, не обоснована расстановка пожарных лафетных стволов на расстоянии 90 % длины струи, а согласно нормативным документам Российской Федерации по пожарной безопасности [71], длина струи оценивается по крайним каплям. Отсутствуют научно обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты исследований того, что на этом расстоянии будет осуществляться подача ОТВ требуемой интенсивности для тушения или охлаждения технологических установок. Также нет опубликованных научных обоснований по разработке воздушно-пенных насадков стволов, что позволяет сделать выводы, что они разработаны также эмпирическим подбором.

Главную роль при формировании эффективных струй ОТВ при тушении пожаров играет универсальный насадок как на ручных пожарных стволах, так и на лафетных стволах, даже при условии, что насадок на ручном пожарном стволе представляет собой неразъемную составную часть его конструкции, а у лафетного ствола – это заменяемая деталь.

1.4 Постановка целей и задач исследования

Анализ статистики пожаров и аварийных ситуаций, сопровождающихся пожарами и взрывами в машинных залах зарубежных АЭС, ТЭС и ГЭС России, показывает, что основными причинами пожаров в машинных залах являются:

– механические разрушения оборудования турбоагрегатов – 59 %, в т. ч. механическая разбалансировка и разгон турбины, повреждение бандажных узлов и выход в двигательный режим генератора и т. д.;

– разуплотнение маслосистем турбоагрегатов – 19 % с фонтанированием или утечкой масла с пропиткой теплоизоляции;

– разуплотнение систем водородного охлаждения генератора – 16 %, с утечками, приводящими к накоплению водородно-воздушной смеси в токопроводах через неплотности выводов, в картерах подшипников через уплотнения вала и иных локальных зонах.

Быстрому развитию пожаров масла и водорода с повреждением основного технологического оборудования и несущих строительных конструкций машинного зала способствует:

– растекание горячего масла через неплотности и проемы на нижерасположенные отметки (кабельные каналы, туннели, полуэтажи), под воздействием пламени оказываются маслопроводы других блоков.

– выбросы и факельное горение газо-масляной смеси с высокотемпературным (до 2000 °С) прямым воздействием факела пламени на несущие строительные конструкции и оборудование;

– большая инерционность времени оперативного реагирования и начала эффективных действий подразделений пожарной охраны (см. таблицу 1.4);

– интенсивное тепловое излучение и задымление машинного зала токсичными продуктами горения в течение короткого времени (5–10 мин), препятствующее эффективным действиям персонала по аварийному плану и пожарным по тушению пожара;

– крайне высокие риски травмирования или гибели персонала и пожарных, привлеченных к ликвидации аварийных ситуаций, сопровождающихся пожарами и взрывами в машинных залах.

Анализ ликвидаций аварийных ситуаций, изложенных в настоящей работе, показал, что за все время пострадало 56 человек из числа персонала и пожарных, в том числе 1 чел. погиб, 15 – получили различные дозы облучения, 26 – отравление продуктами горения и обморожение, 14 – получили термические травмы.

Кроме того, из 49 событий в 11 произошло полное или частичное обрушение несущих конструкций кровли машинных залов с уничтожением технологического оборудования, в 6 произведена остановка и отключение аварийных энергоблоков от сети на срок 15 и более суток.

На основе анализа реальных аварийных ситуаций, изложенных в первой главе, целесообразно определить и выбрать основные приоритеты, принципы и варианты построения надежной системы противопожарной защиты машинных залов действующих и строящихся электростанций.

Анализ применяемых технических средств пожаротушения в машинных залах показал, что наиболее эффективным для тушения и охлаждения ферм перекрытия машинных залов является использование ствольной пожарной техники. При этом для персонала станции наиболее безопасно задействование ствольной техники в составе роботизированных установок пожаротушения.

Несмотря на то, что зарубежные и отечественные стволы с универсальными насадками применяются для тушения пожаров в машинных залах, их применение обосновывается на научных исследованиях, проведенных для стволов конусного типа. Это неприемлемо с точки зрения практики тушения пожаров, особенно на таких государственно важных объектах, как электростанции. До сих пор отсутствуют математические зависимости, позволяющие оценить расход ОТВ из универсального насадка, а также нет коэффициентов местного сопротивления насадков, без которых невозможно рассчитать гидравлические характеристики всего противопожарного водоснабжения объекта. Не изучены зависимости

расхода от щелевого зазора между дефлектором и корпусом универсального насадка, не проведены исследования, влияет ли изменение щелевого зазора на расход насадка, дальность струи, следовательно, и на эффективность тушения. Также не обоснована технология осциллирования при установке на осциллирующее устройство ствольной пожарной техники с универсальными насадками.

И в совокупности не обосновано применение ствольной пожарной техники с универсальными насадками в составе роботизированных установок пожаротушения машинных залов электростанций.

В связи с этим основной целью исследования является обоснование технологии применения универсальных насадков ствольной техники в составе роботизированной установки пожаротушения машинных залов электростанций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

1. Проанализировать пожары на объектах энергетики в целях оценки эффективности существующих средств противопожарной защиты.

2. Экспериментально исследовать гидродинамические показатели ствольной пожарной техники для обоснования оптимальной конструкции универсального насадка.

3. Разработать модель движения ОТВ в атмосфере после его выхода из универсального насадка для математического обоснования огнетушащей способности.

4. Разработать технологию применения ствольной техники с универсальными насадками и интегрировать её в роботизированные установки пожаротушения машинных залов электростанций.

1.5 Выводы по первой главе

Проведенный анализ статистических данных по пожарам на объектах энергетики показывает, что в течение всего исследуемого периода большинство пожаров и аварийных ситуаций (35%) происходили именно в машинных залах электростанций. Наибольшая доля выработки и потребления электроэнергии в Российской Федерации приходится на ТЭС, ГЭС и АЭС, то есть на объекты генерирования энергии, где присутствуют машинные залы. Анализ пожаров в машинных залах электростанций показывает, что пожар с последующей остановкой турбоагрегата может вызвать ряд событий, которые могут привести к каскадному катастрофическому развитию аварийной ситуации. Проведенные до настоящего времени научные исследования подтверждают эти утверждения, так как при аварии в машинном зале происходит розлив турбинного масла с последующим возгоранием. При разливе масла и его горении образуется «конвективная колонка» с температурными полями от 650 до 850 °С, которая приводит к обрушению ферм перекрытия. Также в работе рассмотрены существующие технологии применения ствольной техники для защиты машинных залов электростанций. Выявлено, что вся технология применения основана на ствольной пожарной технике с конусными насадками с образованием только сплошной струи, тогда как современная ствольная техника с универсальными насадками имеет возможность формировать сплошные и распыленные струи, а также изменять угол факела распыла струи в широких диапазонах. Сделаны выводы о том, что требуется технология применения ствольной техники с универсальными насадками для тушения пожаров машинных залов электростанций. В конце первой главы сформированы цели и задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ НАСАДКОВ СТВОЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОГNETУШАЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Для проведения экспериментальных исследований использованы такие виды исследования, как натурный эксперимент, численное математическое моделирование и аналитические решения по расчету течений ОТВ в универсальном насадке. Для проведения натурального эксперимента требуется разработка экспериментального стенда и экспериментальных универсальных насадков с разными геометрическими размерами его деталей.

2.1 Разработка экспериментального стенда для проведения исследований напорно-расходных характеристик пожарной ствольной техники с универсальными насадками

Для выполнения поставленных задач и достижения целей диссертационной работы разработан экспериментальный стенд для проведения гидравлических испытаний гидравлической арматуры, узлов и агрегатов пожарной ствольной техники, в частности для исследования напорно-расходных характеристик универсальных насадков пожарной ствольной техники.

Для проведения оценки напорно-расходных характеристик разработана методика проведения испытаний и собрана измерительная установка, состоящая из вставки с расходомером и гидравлического стенда. Вставка с расходомером, обеспечивающим диапазон измерений расхода ОТВ от 0 до 175 л/с, имеет диаметр условного прохода 150 мм, оборудована восьмью соединительными головками для подсоединения пожарных напорных рукавов (рисунок 2.1).

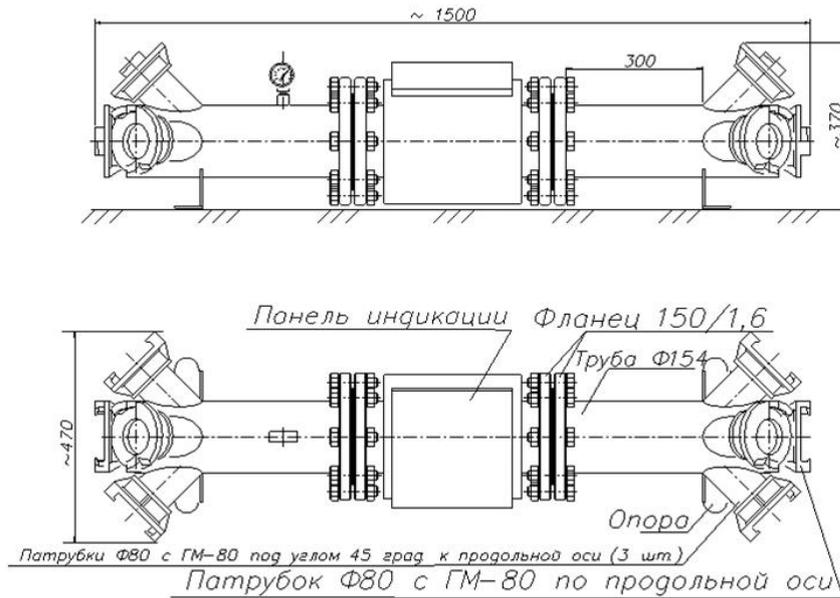


Рисунок 2.1 – Измерительная вставка с расходомером:

вверху – вид сбоку; внизу – вид сверху

Гидравлический стенд (рисунок 2.2) представляет собой разборную конструкцию, предназначенную для монтажа стационарных лафетных стволов с любой ответной частью фланца.

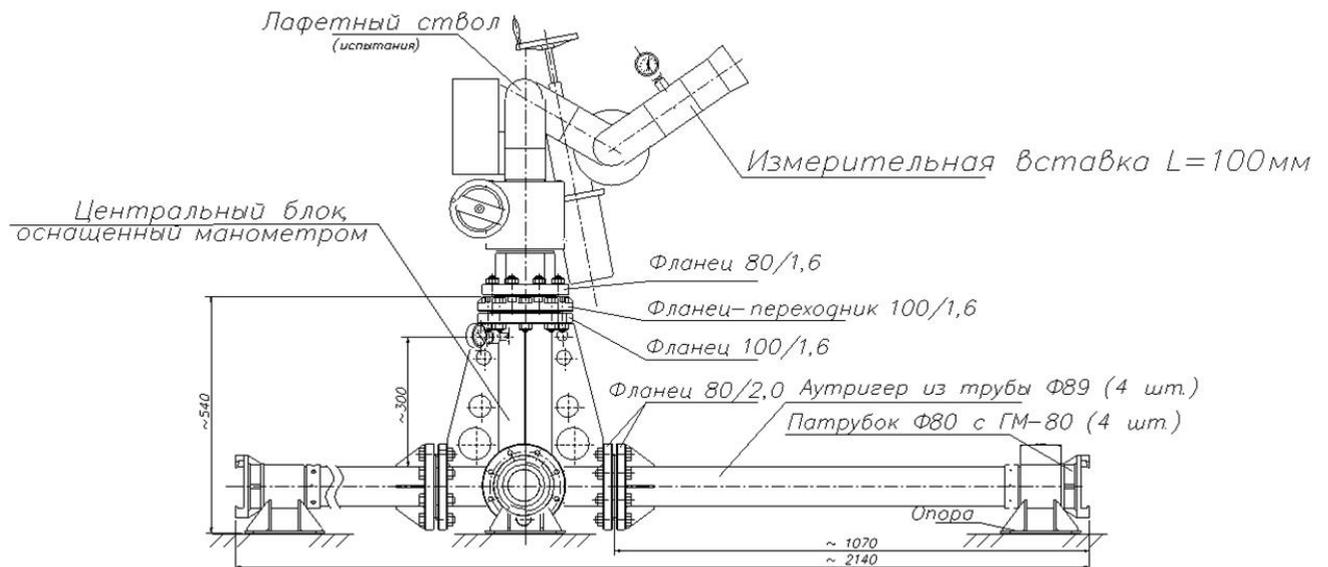


Рисунок 2.2 – Гидравлический стенд

В состав стенда входят следующие элементы:

– центральный блок, который представляет собой вертикальный цилиндр с универсальным фланцем в верхней части, заглушкой в нижней части и четырьмя трубами с фланцами 80/2,0 установленными на нижней четверти цилиндра через

каждые 90 град. Кроме того, внутри цилиндра располагается успокоитель для формирования потока ОТВ, проходящих через трубы с фланцами 80/2,0;

– аутригеры, в количестве четырех штук, представляющие собой трубу диаметром 89 мм с опорой, оборудованную фланцем 80/2,0 с одной стороны и головкой муфтовой ГМ-80 с другой. Аутригеры посредством болтового соединения крепятся к трубам с фланцами 80/2,0 на центральном блоке;

– измерительная вставка с манометром, которая имеет внутреннюю резьбу с одной стороны и наружную с другой. Устанавливается как проставка между проточной частью ствола и насадком. Вставка оборудована штуцером для установки манометра.

При проведении исследований на экспериментальном стенде по определению гидравлических характеристик лафетных стволов пожарный автомобиль с насосной установкой соответствующей производительности устанавливают на ровной поверхности (рисунки 2.3, 2.4).

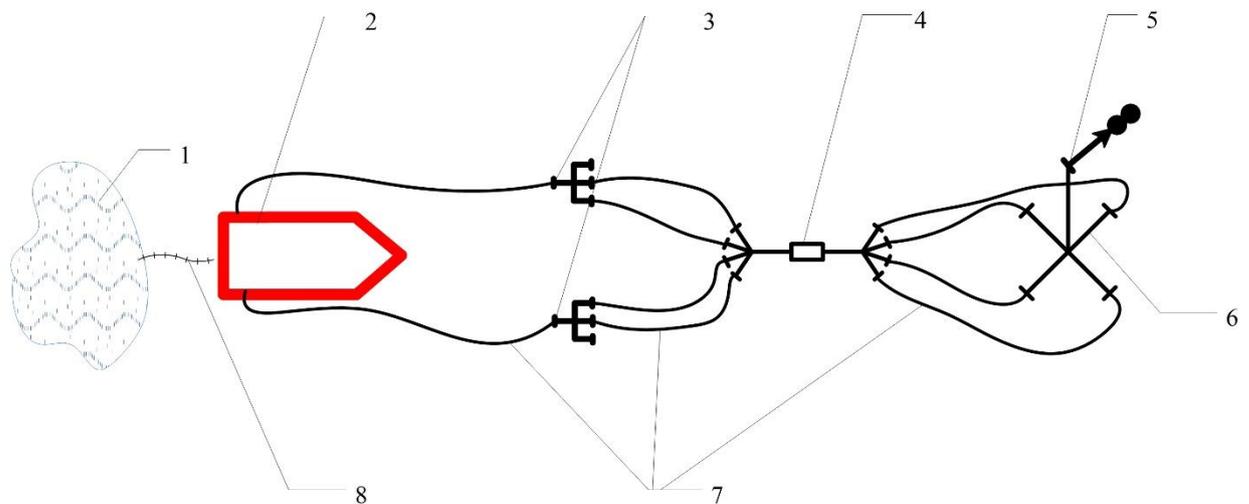


Рисунок 2.3 – Схема экспериментального стенда для проведения исследований:

1 – водоисточник; 2 – автомобиль с насосной установкой; 3 – разветвление трехходовое; 4 – вставка с расходомером и панелью индикации; 5 – лафетный ствол; 6 – стенд для установки ствола; 7 – напорные рукава; 8 – всасывающие рукава

Так как при проведении испытаний возможны высокие показатели расхода огнетушащего вещества, то требуется осуществлять забор воды от внешнего водоисточника, при этом к напорным патрубкам насоса присоединяется необходимое количество пожарных напорных рукавов, которые вторым концом присоединяются к измерительной вставке с расходомером. Измерительная

вставка также посредством пожарных напорных рукавов соединяется с гидравлическим стендом, на который устанавливаются испытываемые образцы.



Рисунок 2.4 – Лафетный ствол, установленный на станине гидравлического стенда

Между насадком ствола и его проточной частью устанавливается вставка с манометром. Целесообразно площадку для испытаний подбирать таким образом, чтобы длина рукавных линий была минимальной, для наименьших гидравлических потерь перед лафетным стволом с универсальным насадком [75]. В процессе испытаний, опираясь на ранее предлагаемую методику [71], необходимо дополнительно фиксировать показания манометров при различных значениях расхода ОТВ.

2.2 Экспериментальные исследования истечения огнетушащих веществ из универсальных насадков

Назначением любого пожарного ствола, в первую очередь конусного типа, является сужение потока ОТВ для наращивания давления. (рисунок 2.5). В результате сужения обеспечивается напор и скорость, которая необходима для формирования огнетушащей струи. Для любого расхода существует один соответствующий размер условного прохода ствола (сужение), который способен создать оптимальное давление и скорость потока ОТВ.

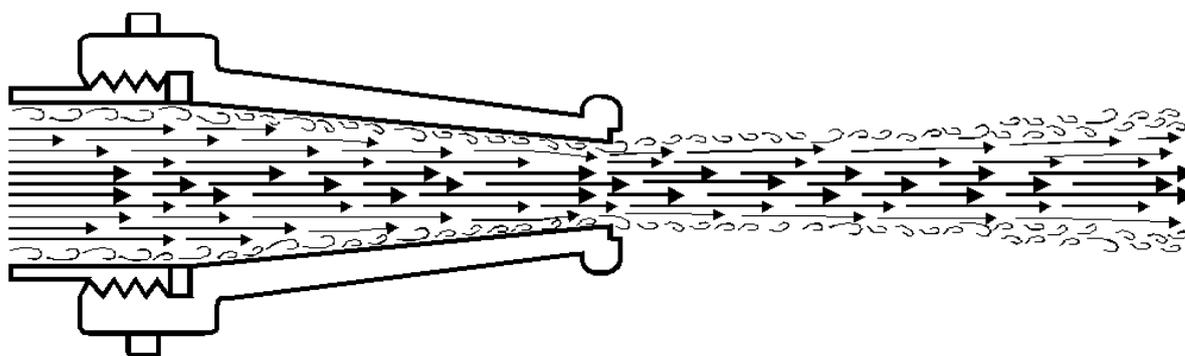


Рисунок 2.5 – Сужение потока ОТВ и завихрения возле стенок корпуса в конусном стволе [76]

Для конструирования ствольной пожарной техники конусного типа применяется уравнение Бернулли (2.1), как частная производная уравнений Навье – Стокса (2.11), которые устанавливают зависимость между скоростью стационарного потока жидкости и ее давлением для двух сечений потока (вход в насадок и выход из насадка). Согласно этому закону, если вдоль линии тока давление жидкости возрастает, то скорость течения убывает, и наоборот [36]. Количественное выражение закона в виде интеграла Бернулли является результатом интегрирования уравнений гидродинамики идеальной жидкости, т. е. в нём не учитывается вязкость и теплопроводность:

$$z_1 \cdot \frac{P_1}{\rho g} \cdot \frac{U_1^2}{2g} = z_2 \cdot \frac{P_2}{\rho g} \cdot \frac{U_2^2}{2g} + H = \text{const.} \quad (2.1)$$

Вышеуказанное уравнение движения идеальной жидкости применимо для ствольной техники с конусным насадком. Однако для ствольной техники с

универсальным насадком, где происходят сложные турбулентные гидродинамические процессы в узком пространстве между дефлектором и корпусом, требуется учитывать силы трения и вязкость жидкости (см. рисунок 2.5) [77–89]. В данном случае необходимо учитывать не просто турбулентный режим течения жидкости, а необходимо учитывать анизотропную турбулентность – течение жидкости, при котором пульсационные скорости не будут во всех направлениях равновероятными и не будут иметь одинаковую величину [90, 91].

Для расчета гидравлических характеристик пожарного трубопровода требуется знать расходы и сопротивление диктующих точек, т. е. пожарных лафетных стволов с универсальными насадками [92, 93]. Для всех насадков, кроме универсальных, формирующих разный угол распыла струи, существуют табличные справочные значения (таблица 2.1), но нет выведенного коэффициента расхода μ , исходя из чего невозможно рассчитать коэффициент сопротивления ζ для универсального насадка.

Таблица 2.1 – Коэффициенты расхода и сопротивления насадков

Вид насадка	Коэффициент расхода μ	Сопротивление ζ
Внешний цилиндрический	0,82	0,5
Конoidalный	0,96	0,53
Конусный	0,96	0,09
Конусный расходящийся	0,45	3

Непосредственно коэффициент сопротивления ζ влияет на расчет потери давления в подводящем трубопроводе водообеспечения на пожаротушение. Расчет потерь давления определяется по формуле:

$$\Delta h = \left(\frac{\lambda \cdot L}{d_3} + \Sigma \zeta \right) \cdot \left(\frac{w^2}{2g} \right), \quad (2.2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; L – длина трубопровода, м; d_3 – гидравлический диаметр, м; ζ – коэффициент местного сопротивления; w – скорость движения жидкости, м/с.

Для определения напорно-расходных характеристик и огнетушащей эффективности пожарной ствольной техники с универсальным насадком необходимо обосновать влияние геометрических параметров универсального насадка на процесс истечения ОТВ. Для этого были разработаны универсальные

насадки (рисунок 2.6) с разным размером проходного канала корпуса насадка, дефлекторы и бамперы в разном конструктивном исполнении. Разработанные экспериментальные универсальные насадки по своей конструкции состоят из корпуса, дефлектора и бампера.



а



б

Рисунок 2.6 – Фото экспериментального насадка:

а – общий вид корпуса насадков; б – зазор между дефлектором и корпусом насадка

В универсальном насадке имеется 3 критических сечения, которые влияют на расходные характеристики: площадь поперечного сечения внутри корпуса насадка (ω_k), площадь поперечного сечения кольцевого зазора (ω_3), а также площадь поперечного сечения между дефлектором и бампером (ω_6). Для обеспечения расходных характеристик, расход огнетушащих веществ должен удовлетворять условию:

$$\omega_k \geq \omega_3 \geq \omega_6.$$

Но, как правило, в универсальном насадке формируется условие:

$$\omega_k \geq \omega_6 \geq \omega_3.$$

Диктующим условием расхода в универсальном водопенном насадке является площадь поперечного сечения между дефлектором и корпусом насадка.

В универсальном насадке самую главную роль играет дефлектор (2) – это тарельчатый диск, который располагается непосредственно после поперечного

сечения трубопровода ствола (1) на определенном расстоянии (образуя кольцевой щелевой зазор), через который огнетушащее вещество может выходить из ствола в разные стороны, с углом факела распыла струи до 120° и более (4). Далее, с помощью внешнего регулятора (бампера), геометрия струи регулируется до требуемого угла распыла (рисунок 1.22).

Напорные характеристики в универсальной насадке характеризуются коэффициентом местного сопротивления, показатели которого в универсальной насадке высокие из-за изменяющейся геометрии проточной части, которая образует турбулентные вихри. Это говорит о том, что для наименьших потерь напора неприемлемо изготовление тарельчатого дефлектора (изображение б на рисунке 2.7) и требуется изготовление дефлектора, в форме вытянутого треугольника с заходом вершины в проточную часть корпуса универсальной насадки (изображение б на рисунке 2.7). Но тогда возможно сужение площади проходного сечения ω_3 , вследствие чего уменьшатся расходные характеристики. Поэтому необходимо изготовление дефлектора с формой усеченного конуса, это обеспечит наибольшую пропускную способность, а также уменьшит гидравлические потери напора в насадке.

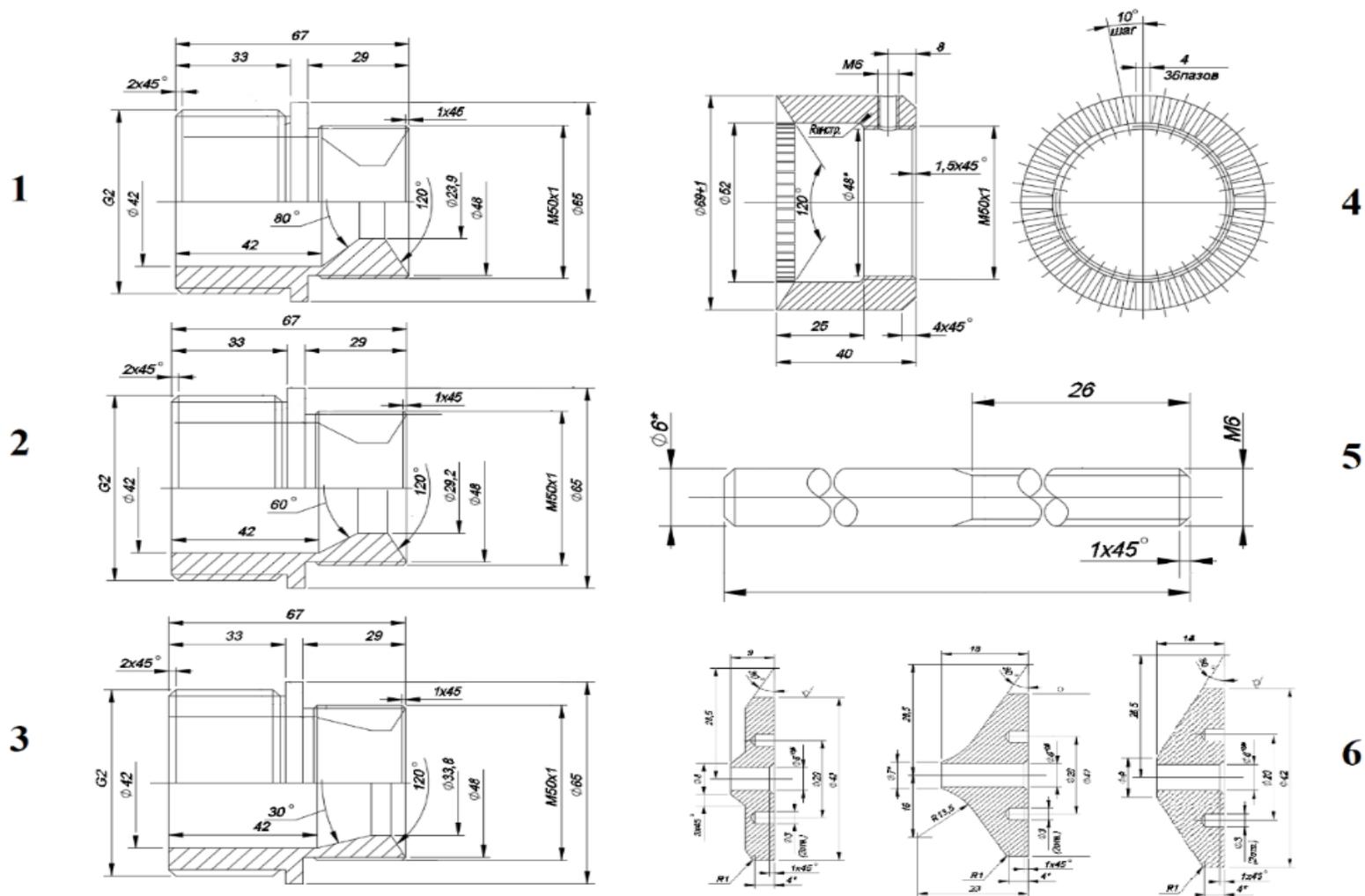


Рисунок 2.7 – Разработанные детали экспериментального универсального насадка:

1 – корпус насадка с расходом 10 л/с; 2 – корпус насадка с расходом 15 л/с; 3 – корпус насадка с расходом 20 л/с; 4 – бампер универсального насадка; 5 – шток (держатель дефлектора); 6 – дефлекторы с разной геометрией

Так как конструкция корпуса универсального насадка без установленного дефлектора представляет собой конусный насадок, то расход из корпуса универсального насадка без установленного дефлектора будет определяться по формуле (1.5).

Для определения расчетных формул универсального водопенного насадка, были рассчитаны диаметры выходного сечения корпуса насадка по формуле (1.5) и изготовлены экспериментальные универсальные водопенные насадки, для расходов равных 5, 10, 15, 20 л/с при давлениях от 0,4 до 1 МПа (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Результаты расчетов для корпуса насадка без дефлектора

Расход, л/с	Диаметры поперечных сечений (мм) при разных давлениях (МПа)						
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
5	16,07	15,20	14,52	13,97	13,51	13,12	12,78
10	22,72	21,49	20,53	19,76	19,11	18,55	18,07
15	27,83	26,32	25,15	24,20	23,40	22,72	22,13
20	32,14	30,39	29,04	27,94	27,02	26,24	25,56

Так как рабочий диапазон давлений ствольной пожарной техники чаще всего варьируется от 0,4 до 1 МПа, то для разработки экспериментальных насадков, при расчетах применяли средний показатель 0,6 МПа. Разработанные корпус, дефлектор и бампер экспериментального насадка представлены на рисунке 2.7.

Для оценки напорно-расходных характеристик экспериментальные насадки были установлены на экспериментальный стенд и проведена проливка (рисунок 2.8) по разработанной методике проведения эксперимента.



Рисунок 2.8 – Проливка экспериментального насадка

В процессе самого эксперимента изменялись расстояния между дефлектором и корпусом насадка, т. е. менялась площадь сечения зазора для прохождения потока ОТВ. При этом производили замеры расхода ОТВ и абсолютного давления перед экспериментальным насадком в диапазоне 0,4–1,0 МПа.

Замеры производили путем пошагового постепенного увеличения зазора с шагом 1,5 мм. Данный размер шага обусловлен тем, что зазор регулировался путем подстановки шайб толщиной 1,5 мм между держателем штока дефлектора и успокоителем потока в корпусе экспериментального универсального насадка. Результаты замеров показаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Показатели зависимости расходов от зазора между дефлектором и корпусом для экспериментального насадка с расходом 5 л/с

Зазор, мм	Расход, л/с, при разных давлениях, МПа						
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1,5	3,08	3,40	3,87	4,27	4,58	4,73	5,1
3	3,7	4,17	4,77	5,08	5,2	5,47	5,9
4,5	4,07	4,72	5,08	5,57	5,73	5,95	6,38
6	4,65	5,17	5,83	6,45	6,67	7,23	7,67
>6	4,78	5,63	6,04	6,51	7,04	7,31	7,81
Без дефлектора	5,63	6,2	6,83	7,5	8,12	8,73	8,85

После увеличения зазора более чем 6 мм, показатели расхода не изменялись. Данные из таблицы 2.3 и рисунка 2.9 показывают, что чем меньше зазор между дефлектором и корпусом насадка, тем расход жидкости меньше. Усредненные показатели расхода жидкости, занижения расхода из-за расстояния между дефлектором и корпусом ствола также показаны в таблице 2.4.

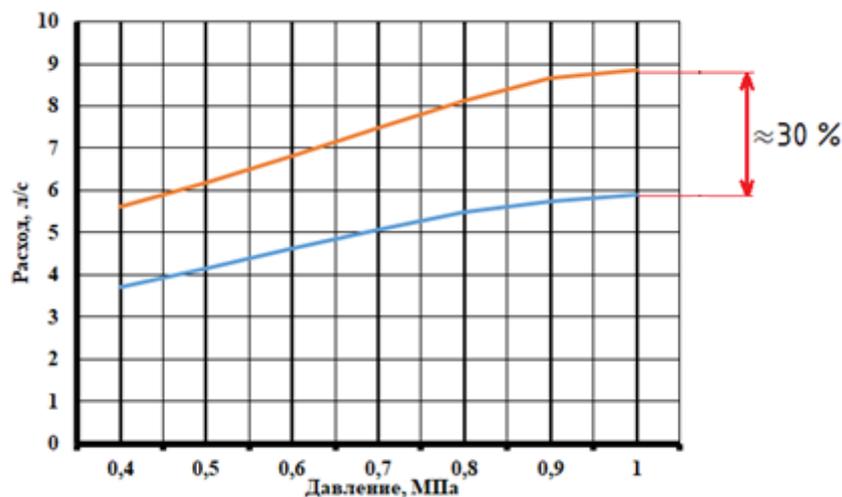


Рисунок 2.9 – Разница напорно-расходных характеристик для экспериментального универсального насадка с расходом 5 л/с

Таблица 2.4 – Процент добавления показателя расхода, в зависимости от зазора между дефлектором и корпусом

Зазор между дефлектором и корпусом насадка, мм	Увеличение расхода П, %
1,5	45 (1,45)
3	35 (1,35)
4,5	30 (1,3)
6	20 (1,2)
>6	15 (1,15)

После обработки всех эмпирических показателей можно сделать вывод, что независимо от давления перед насадком, при усредненном показателе зазора процентное соотношение пропускной способности зазора и диаметра круглого сечения сечения корпуса насадка составляет 30 %. После эмпирического метода выведения коэффициента расхода для зависимости нахождения расхода ОТВ была проведена верификация полученных данных уже на промышленном образце лафетного ствола с универсальным насадком производства компании ООО «Уралмеханика» (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Проведение испытаний по истечению ОТВ из универсального насадка лафетного ствола ООО «Уралмеханика»

Результаты верификации показали полное совпадение с выведенными эмпирическими зависимостями показателями (увеличение расхода П, %, в таблице 2.4). Для того чтобы подтвердить эмпирические показатели, было проведено численное моделирование исследуемых процессов течения ОТВ в

целях валидации натуральных показателей и результатов численного моделирования в программном комплексе *ANSYS Fluent* (модели для расчета были приняты согласно информации, изложенной в 2.2.1) (рисунок 2.11).

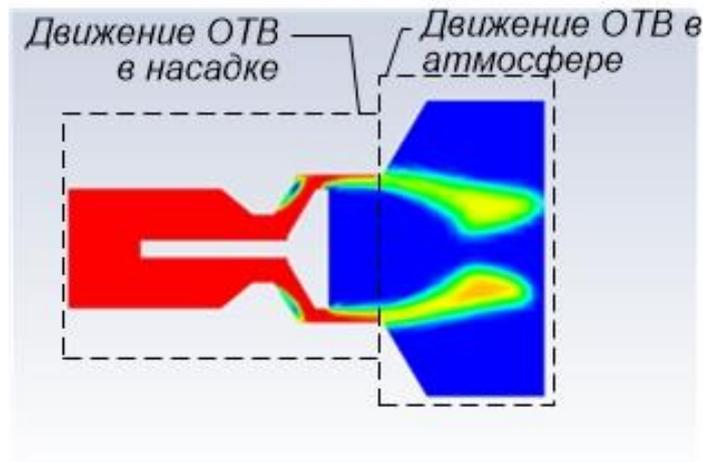


Рисунок 2.11 Результаты численного моделирования экспериментального насадка с расходом 20 л/с

Путем обратных вычислений, в программном комплексе *ANSYS Fluent*, которые основаны на расчете методом конечных объемов показали, что при установке дефлектора в универсальный насадок необходимо увеличивать расход проточной части универсального насадка на 31 % (понижающий коэффициент равен 1,31), чтобы обеспечить показатели получаемые без дефлектора. Полученные в программном комплексе *ANSYS Fluent* данные позволяют, подставив в формулу (1.5) значение Π как 1,31, при этом учитывая то, что коэффициент расхода для конусных насадков равен 0,82 (см. таблицу 2.1), тогда коэффициент расхода универсального насадка будет равен:

$$\mu_y = \frac{\mu}{\Pi} = \frac{0,82}{1,31} = 0,63,$$

$$\mu_y = \sqrt{\frac{1}{\zeta_y + \alpha}}, \quad (2.3)$$

Здесь μ – коэффициент расхода для проточной части универсального насадка (принят как для конусного 0,82, таблица 2.1); Π – выведенный повышающий коэффициент расхода при установке дефлектора в проточную часть канала универсального насадка.

Окончательно формула нахождения расхода при истечении ОТВ из универсального насадка выглядит так:

$$Q = \mu_y \cdot S_k \sqrt{2gH}, \quad (2.4)$$

где μ_y – коэффициент расхода универсального насадка (0,63); S_k – площадь поперечного сечения проточной части универсального насадка до дефлектора (корпуса), м².

Исходя из зависимости (2.3) коэффициент сопротивления ζ для универсального насадка будет находится по зависимости:

$$\zeta_y = \frac{1}{\mu_y^2} - \alpha, \quad (2.5)$$

где α – коэффициент Кориолиса (равен 1).

Тогда коэффициент сопротивления универсального насадка ствольной пожарной техники будет равен:

$$\zeta_y = \frac{1}{0,626} - 1 = 0,597 \approx 0,6.$$

Эксперимент показывает, что для получения требуемого расхода ОТВ из универсального насадка, необходим расчетный показатель расхода корпуса насадка без дефлектора умножить на выведенный коэффициент расхода универсального насадка.

Для расчета гидравлических характеристик противопожарного водоснабжения объекта защиты, где используется ствольная пожарная техника с универсальным насадком необходимо использовать показатель сопротивления универсального насадка, равный 0,6.

2.2.1 Определение влияния конструкции универсального насадка на его гидравлические характеристики

Как было указано в первой главе, из универсального насадка ОТВ выходит с одинаковой скоростью на всех участках разреза струи в отличие от сплошной струи, выходящей из конусного насадка, где она имеет значительно большую скорость в центре, чем по краям, и уже на выходе имеет тенденцию к распаду. Вакуум, создаваемый внутри прямой распыляющей струи, фокусирует струю к центру после прохождения небольшого расстояния от насадка (см. рисунок 1.23) и равномерно заполняет весь внутренний объем капельной массой.

Данные утверждения были высказаны как отечественными исследователями ствольной пожарной техники [15–34], так и зарубежными учеными [37–39, 89]. Но все эти высказывания, основывались на аналитических выводах. Для определения геометрических параметров зоны разряжения требуется произвести продольный разрез струи. В натурном эксперименте это сделать крайне сложно, поэтому в данной работе было принято решение с помощью численного моделирования процесса течения жидкости через проточную часть универсального насадка определить геометрические параметры зоны разряжения. Для решения данной задачи было принято решение использовать пакет вычислительной гидрогазодинамики *ANSYS Fluent*, который является одним из наиболее современных на рынке. Этот пакет содержит широкий набор верифицированных моделей, которые обеспечивают получение точных результатов для различных задач [94–96].

Для численного моделирования многофазного течения, в данном случае моделирования двухфазного потока «жидкость-газ», необходимо определиться с моделью турбулентности. Для использования низкорейнольдсовых моделей турбулентности необходимо обеспечить явное разрешение пристеночной области. Для этого выбирается параметр Y^+ , который определяет соотношение между размером сеточного элемента и пристеночным слоем:

$$Y^+ = \frac{\rho \cdot y \cdot U_\tau}{\mu}, \quad (2.6)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; μ – динамическая вязкость среды, Па·с; U_τ – скорость сдвига, м/с.

Для расчета размера первой ячейки необходимо рассчитать число Рейнольдса:

$$Re_d = \frac{\rho \cdot U_{cp} \cdot d}{\mu}, \quad (2.7)$$

где d – диаметр проточного канала, м.

Сдвиговые напряжения у стенки насадка определяются по формуле:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot U_{cp}^2, \quad (2.8)$$

где C_f – коэффициент трения.

Коэффициент трения определяется по формуле:

$$C_f = 0,079 Re_d^{-0,25}. \quad (2.9)$$

Скорость сдвига определяется по формуле:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \quad (2.10)$$

В *Ansys Fluent* метод конечных объемов численно решается с помощью системы уравнений Навье – Стокса:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dv_x}{dt} &= \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{dv_y}{dt} &= \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; $\frac{d\vec{v}}{dt}$ – изменения скорости жидкости в точке; P – давление, Па.

Существующие подходы к численному моделированию турбулентных течений основаны на степени детальности разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра. В рассматриваемой задаче с универсальным насадком будем использовать RANS-метод, в котором уравнения Навье – Стокса позволяют получить уравнения переноса для средних значений величин,

случайным образом пульсирующих в турбулентном потоке. Для этого используется разложение мгновенного значения скорости u в уравнении Рейнольдса на сумму среднего значения \bar{u} и пульсационной составляющей u' . Подстановка такого разложения в уравнение неразрывности и уравнение движения и их последующее осреднение позволяет получить систему уравнений для среднего поля скоростей. Эту систему называют уравнениями Навье – Стокса, осредненными по Рейнольдсу (Reynolds-averaged Navier – Stokes equations или уравнения RANS) [36].

При проведении расчетов в осредненных уравнениях появляются неизвестные корреляции пульсирующих величин, без определения которых осредненные уравнения не могут быть решены, так как возникает проблема замыкания. Для решения проблемы замыкания привлекаются модели турбулентности, которые выражают неизвестные корреляции через известные (точнее – искомые) осредненные значения. Численное решение зависит от пространственной сетки и шага по времени. Последовательное уменьшение ячеек пространственной сетки и шагов по времени в принципе позволяет получить сеточнезависимое (точное) решение уравнений RANS [97–100].

Для моделирования турбулентного течения жидкости во внутренней полости универсального насадка необходимо использовать модель турбулентности SST (Shear Stress Transport model), которая, как показал опыт [97], приводит к лучшему согласию с экспериментом в высокотурбулентном течении с завихрениями и отрывами, которые наблюдаются в универсальном насадке. SST модель основана на линейной комбинации $k-\omega$ модели Уилкокса в пристеночных областях [101] и $k-\varepsilon$ модели вдали от стенок. Уравнения $k-\omega$ модели имеют вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho \cdot P_k - \rho \cdot C_\mu \cdot k \cdot \omega, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha_1 \frac{\omega}{k} \rho \cdot P_k - \rho \cdot \beta_1 \cdot \omega^2, \quad (2.13)$$

Здесь $Pk = \tau_{ij}S_{ij}$ – генерационный член; τ_{ij} – тензор рейнольдсовых напряжений; S_{ij} – тензор скоростей деформации среднего течения; C_μ – коэффициент вязкости; ω – удельная скорость диссипации, $\sigma k1, \sigma k3, \sigma \omega1, \sigma \omega2, \sigma \omega3, \alpha1, \alpha2, \alpha3, \beta1, \beta2, \beta3$ – константы.

Уравнения k – ε модели записываются, используя ω вместо ε , и имеют вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho \cdot P_k - \rho \cdot C_\mu \cdot k \cdot \omega, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_2 \frac{\omega}{k} \rho \cdot P_k - \rho \cdot \beta_2 \cdot \omega^2. \quad (2.15)$$

Формула турбулентной вязкости имеет вид:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}. \quad (2.16)$$

Так как модель k – ω лучше описывает пристеночные течения в пограничных слоях, а k – ε вдали от стенок. Исходя из этого формируется комбинированная k – ω модель:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho \cdot P_k - \rho \cdot C_\mu \cdot k \cdot \omega, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \rho \cdot P_k - \rho \cdot \beta_2 \cdot \omega^2. \quad (2.18)$$

Таким образом, вклад k – ω и k – ε модели определяется значением функции переключателя:

0, вдали от поверхности, k – ε модель

1, внутри пограничного слоя, k – ω модель

Для моделирования гидрогазодинамических процессов истечения ОТВ из универсального насадка требуется выбрать необходимый метод решения. Для моделирования первичного импульсного истечения ОТВ из универсального насадка и баллистики струи ОТВ требуется применение метода *Multiphase* (многофазный поток).

Метод *Multiphase* или многофазный поток – это метод, когда в потоке одновременно присутствуют различные фазы. Вещества в потоке могут быть в твердом, жидком или газовом состоянии. Существует четыре основные категории

многофазных потоков: газ – жидкость; газ – твердое; жидкость – твердое, также возможно многофазные потоки 3-х и более фаз. При моделировании важно учитывать вид многофазного потока. При движении жидкости или газа существует два вида потока: дисперсный и разделенный. При первичной подаче давления в ствольную пожарную технику с последующей первичной импульсной подачи ОТВ, а также при движении ОТВ в атмосфере (баллистика струи) присутствует четкий раздел фаз «жидкость – газ», т. е. «ОТВ – воздух».

Для описания и прогнозирования физики многофазного течения требуется применение определенных моделей. Моделирование многофазного течения очень сложно, потому что присутствует нелинейность решения системы дифференциальных уравнений. Для валидации данных моделирования с натурными показателями требуется подобрать именно ту модель, которая может объяснить различные уровни информации, т. е. различные уровни точности, и подойдет для моделирования многофазного потока истечения ОТВ из универсального насадка.

В методе *Multiphase* программного комплекса *ANSYS Fluent* существует 6 моделей движения многофазного потока:

- 1) Лагранжева модель дисперсной фазы (*DPM*), в основе которой лежит рассмотрение движения отдельных частиц (или групп частиц) дисперсной фазы;
- 2) Эйлера модель (*Eulerian model*), в основе которой лежит рассмотрение изменений параметров течения (скоростей, давлений, температур) в точках пространства;
- 3) модель плотной дисперсной фазы (*DDPM*) – совокупность Лагранжевой и Эйлеровой модели движения многофазного потока;
- 4) модель смеси разных фаз потока (*Mixture*);
- 5) модель несмешивающейся жидкости (*Immiscible fluid model*) – более расширенная Эйлерова модель;
- 6) модель объемной жидкости (*Volume of the liquid model (VOF)*) – прямой метод прогнозирования формы границы раздела между несмешивающимися фазами.

Наиболее подходящим для вышеуказанных задач подходит модель *Volume of the liquid* (далее – *VOF*), так как при движении из универсального насадка воды и воздушно-механической пены существует четкое разграничение фаз, также все составляющие исследуемого ОТВ находятся в нетвердом, жидком или газовом состоянии. Модель *VOF* используется для моделирования стратифицированных течений несмешиваемых сред с четким протяженным (т. е. сравнимым по размеру с размерами расчетной области) интерфейсом (границей раздела). Форма этого интерфейса является единым из результатов моделирования. Для всех фаз при этом решается один единый набор уравнений сохранения импульса, плюс уравнения переноса объемной доли каждой фазы. Далее в работе будет смоделировано течение жидкости в универсальном насадке с помощью методов указанных в [94-101].

Основная идея метода *VOF* состоит во введении переменной – относительный объем жидкости f , который содержится в выделенном объеме. Если $f = 1$, то жидкость полностью занимает ячейку, если 0 – то ее занимает газовая фаза (или вакуум, если газовая фаза не рассматривается). Если $0 < f < 1$, то ячейка содержит свободную поверхность. Для переменной f решается уравнение баланса массы в ячейке:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla V f = 0. \quad (2.19)$$

Уравнение (2.19) записано для случая несжимаемой жидкости, чтобы упростить дальнейшее изложение. Введем N -е количество несмешивающихся фаз, имеющих относительный объем фазы в каждой ячейке f_i , которые имеют скорость V_i . Тогда для N -й фазы будет справедливо уравнение переноса:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \nabla V_i f_i = 0. \quad (2.20)$$

в очевидное равенство:

$$\sum_{i=1}^N f_i = 1. \quad (2.21)$$

Когда решается уравнение (2.21) для первой фазы, происходит перемещение не только фазы 1, но и остальных фаз согласно (2.19), причем перемещение фаз в контрольных объемах, которые не были заняты ими в начале шага по времени,

что приводит к передаче им массы и импульса. Таким образом, на границе раздела фазы 1 и других фаз, меняется скорость фаз. Далее, по новым показателям скорости решается уравнение (2.11) для фазы 2 в контрольных объемах, не занятых полностью фазой 1. И так далее, пока не будет решено уравнение для фазы $N-1$. Объем фазы N находится из уравнения (2.21). Таким образом, данная математическая модель позволяет рассчитывать движение многофазной несмешиваемой жидкости с произвольным количеством компонентов.

Модель *VOF* также, как и модель *Mixture*, имеет один и тот же подход к решению поставленных задач, только существует отличие в том, что, в модели *VOF* отсутствует взаимное проникание фаз, но модель *Mixture* позволяет двигаться разным фазам с разной скоростью. Данные две модели движения многофазных сред решаются с помощью трех уравнений:

Уравнение неразрывности смеси:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = 0. \quad (2.22)$$

Уравнение импульса смеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \vec{u}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = & -\nabla p + \nabla [\mu_{eff} (\nabla \vec{u}_m + \nabla \vec{u}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \\ & + \vec{F} + \nabla \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_k^r \vec{u}_k^r. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Уравнение переноса вторичной фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_p^r). \quad (2.24)$$

Как видно из результатов численного моделирования (рисунок 2.12) после дефлектора образуется зона разряжения, не как было указано в первой главе – конус, а зона разряжения в виде купола. Кроме этого присутствует утечка жидкости из места схождения струи в сплошную и затем завихренное засасывание в движущиеся потоки стенок образовавшегося купола.

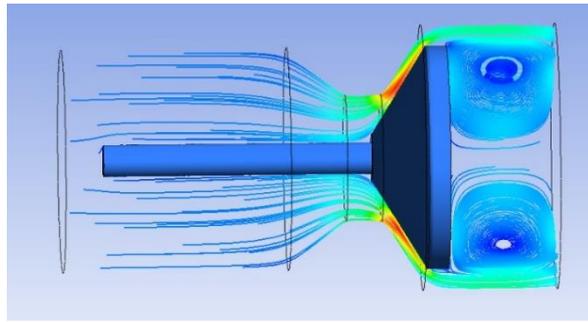


Рисунок 2.12 – Циркуляция потоков в вакууме после дефлектора ОТВ
в экспериментальном универсальном насадке с расходом 20 л/с

Для описания процесса и объяснения физических явлений, происходящих при истечении жидкости из экспериментального универсального насадка, была создана схема разреза продольного сечения с направляющими векторами скоростей и показателями давления, воздействующими на образованный купол (рисунок 2.13). Схема истечения ОТВ из ниверсального насадка была разделена на 2 сечения: сечение I-I начало исследуемого участка и сечение II-II, конец исследуемого участка.

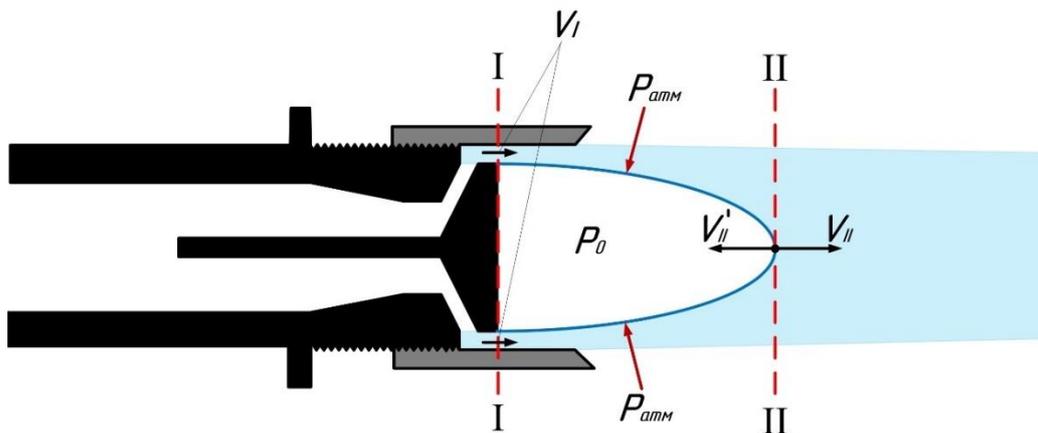


Рисунок 2.13 Схема образования вакуума после универсального насадка

В сечении I-I имеется скорость, равная V_I . При выходе из щелевого зазора кольцевой формы из-за высоких показателей скоростей между потоками создается область пониженного давления, которая заставляет сомкнуться выходящие потоки в точку a на сечении II-II. В следствии чего из данной точки вектор скорости, по инерции струи направлен соосно центру оси насадка, но так как в данной точке потоки соударяются, то теряется их кинетическая энергия, и энергия образовавшегося вакуума становится больше кинетической энергии потока струи. Вакуум, совершая работу, производит подсосывания струйки воды в

свою полость. При этом стоит заметить, что энергия вакуума меньше, чем кинетическая энергия потока струи от среза выхода универсального насадка (сечение I-I) до точки *a* (сечение II-II), поэтому не происходит схлапывание образовавшейся зоны разряжения (рисунки 2.12–2.14).



Рисунок 2.14 – Конус разряжения при подаче пенной эмульсии

В точке *a* происходит раздвоение потока, где большая часть потока по энергии движется, удаляясь от среза насадка и небольшая часть за счет энергии вакуума подсасывает внутрь вакуума. За счет разряжения потока струи (стенок образовавшегося купола) ОТВ засасывается назад, происходит мини циркуляция небольшого количества ОТВ в образовавшемся вакууме (см. рисунок 2.12).

При этом образованный вакуум выполняет свою главную функцию – стягивает струю капельной смеси, так как при выходе из универсального насадка отсутствует сплошность потока, и выходит капельная смесь, образуя тугую струю с наибольшей дальностью подачи огнетушащей эффективностью.

В сечении I-I энергия струи равна:

$$E_{I-I} = \frac{m_I \cdot V_I^2}{2}. \quad (2.25)$$

В сечении II-II энергия струи, которая по инерции идет от среза ствола равна:

$$E_{II-II} = \frac{m_{II} \cdot V_{II}^2}{2}. \quad (2.26)$$

В том же сечении II-II энергия струи, которая подсасывается вакуумом равна:

$$E_{II-II} = \frac{m'_{II} \cdot V'^2_{II}}{2}. \quad (2.27)$$

Из этого следует, что энергетический баланс будет соблюдаться при выполнении следующего равенства:

$$\frac{m_I \cdot V_I^2}{2} = \frac{m_{II} \cdot V_{II}^2}{2} + \frac{m'_{II} \cdot V'^2_{II}}{2}. \quad (2.28)$$

Учитывая вышеизложенное можно сказать, что универсальный насадок с дефлектором не только обеспечивает формирование распыленных струй, но и формирует турбулизированную сплошную струю ОТВ с тенденцией тугого (стянутого) движения в атмосфере, нежели сплошные струи сформированные конусным насадком (рисунок 2.14).

По полученной зависимости (2.28) в дальнейшем возможно конструирование дефлекторов универсальных насадков с учетом требований по образованию необходимых струй ствольной пожарной техники.

2.2.2 Определение влияния конструкции универсального насадка на баллистику струи огнетушащего вещества

На сегодняшний день проектировщиками систем пожаротушения на базе пожарных лафетных стволов основной акцент в расстановке стволов делается на карты орошения (см. рисунок 1.20), т. е. рассматривают горизонтальную плоскость, чтобы выполнить требования по орошению не менее двумя струями пространство объекта. При этом проектировщики забывают про вертикальную составляющую, т. е. про высотные объекты в виде ретификационных колонн, газовых факелов и т. п. При возгорании таких видов технологического оборудования также потребуются тушение и для этого необходимо рассчитывать баллистические характеристики ОТВ при подаче стационарными пожарными лафетными стволами еще на стадии проектирования объекта.

Баллистика – наука, изучающая движение тела в поле гравитации и воздушной среде. Еще с XIX в. расчеты движения брошенного тела производились по формулам параболической теории. Уравнение траектории сплошной струи выводят из предположения, что все ее частицы движутся подобно твердому телу, брошенному под углом к горизонту (рисунок 2.15) [45].

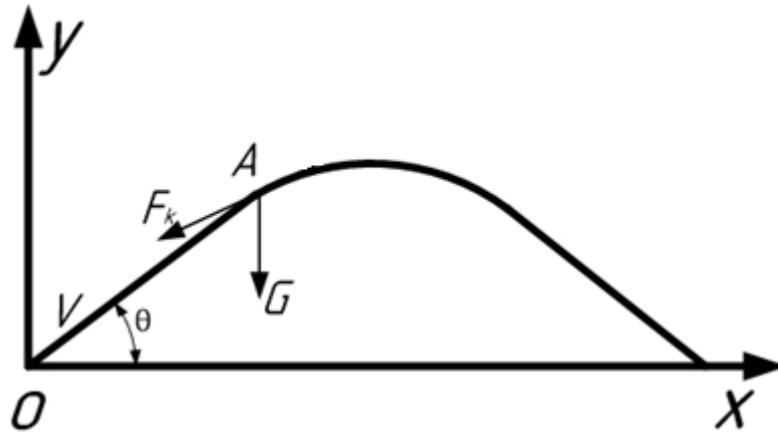


Рисунок 2.15 – Расчет теоретической траектории сплошной струи [17]

В этом случае уравнение траектории струи, на которую действуют силы инерции, тяжести G и сопротивления воздуха F_k в параметрической форме может быть представлено в виде:

$$x = V_0 t \cos \Theta - k \frac{x}{d} \cdot \frac{V_0^2}{2g}, \quad (2.29)$$

$$y = V_0 t \sin \Theta - k \frac{y}{d} \cdot \frac{V_0^2}{2g} - \frac{gt}{2}, \quad (2.30)$$

где x и y – координаты частицы струи в произвольно выбранной точке; V_0 – начальная скорость движения струи при выходе из насадки; Θ – угол наклона ствола к горизонту; t – время; d – диаметр струи; k – коэффициент сопротивления трению в воздухе.

Исключив время из формул (2.29), (2.30) и сделав небольшие преобразования, получаем:

$$y = x t \operatorname{tg} \Theta - \frac{x}{(2 \cdot H \cdot \cos^2 \Theta) \cdot \left(1 + \frac{k}{d} \cdot H\right)}. \quad (2.31)$$

По данным формулам максимальная теоретическая дальность полета струи имеет место при угле наклона ствола $\Theta = 45^\circ$. В действительности же,

на практике, формула (2.31) не показывает расчетный результат и при опытном использовании ствольной пожарной техники наибольшая дальность полета струи будет достигаться при угле наклона ствола $\Theta = 30\text{--}34^\circ$. Несовпадение теоретических и практических данных особенно на раздробленном участке объясняется сложной структурой струи, и разделение ее сплошности на отдельные составляющие (сплошная, раздробленная и распыленная часть струи) [15].

В [15] приведено приближенное уравнение траектории полета струи, сходное с уравнением (2.31):

$$y = x t \operatorname{tg} \Theta - \frac{g x^2}{(2 \cdot V_0^2 \cdot \cos^2 \Theta)} (1 + K \cdot V_0^2 \cdot X), \quad (2.32)$$

где K – эмпирический коэффициент, определяемый опытным путем при максимальной горизонтальной дальности X .

Все приведенные выше формулы не коррелируются с практическими показателями. Кроме этого, данные формулы применяли для расчета траектории движения ОТВ из конусных насадков, где выходная скорость потока ОТВ намного меньше скорости потока в универсальных насадках (данный факт был подтвержден в (2.2)).

Учитывая неэффективность формул (2.29)–(2.32), до создания универсальных насадков пожарных лафетных стволов, для облегчения расчета наклонных струй при истечении ОТВ из конусных насадков, сначала рассчитывался показатель высоты вертикальной струи. Свободная водяная струя конусного насадка при истечении из вертикально направленного ствола со скоростью V_0 , теоретически поднимается на высоту $H_m = \frac{V^2}{2g}$, так как в конусном насадке вся потенциальная энергия переходит в кинетическую. Но необходимо учитывать, что часть энергии расходуется на преодоление сопротивлений вследствие трения струи о воздух, и поэтому струя поднимается на несколько меньшую величину.

Для нахождения данной высоты струи конусного насадка использовались идентичные формулы Люгера (2.33) или Фримана (2.34):

$$H_e = \frac{H}{1 + \varphi \cdot H}, \quad (2.33)$$

$$H_e = H(1 - 0,000113 \cdot H/d), \quad (2.34)$$

Здесь, H_e – высота сплошной вертикальной струи, м; H – напор перед насадком, м.в.ст; φ – эмпирический коэффициент; d – диаметр выходного сечения насадка, м.

Учитывая, что для пожаротушения применяются наклонные струи, то при одном и том же напоре и разном уклоне получаются разные траектории движения огнетушащего вещества (рисунок 2.16). Если соединить верхние точки траектории струи, получается огибающая при различных углах наклона пожарного ствола.

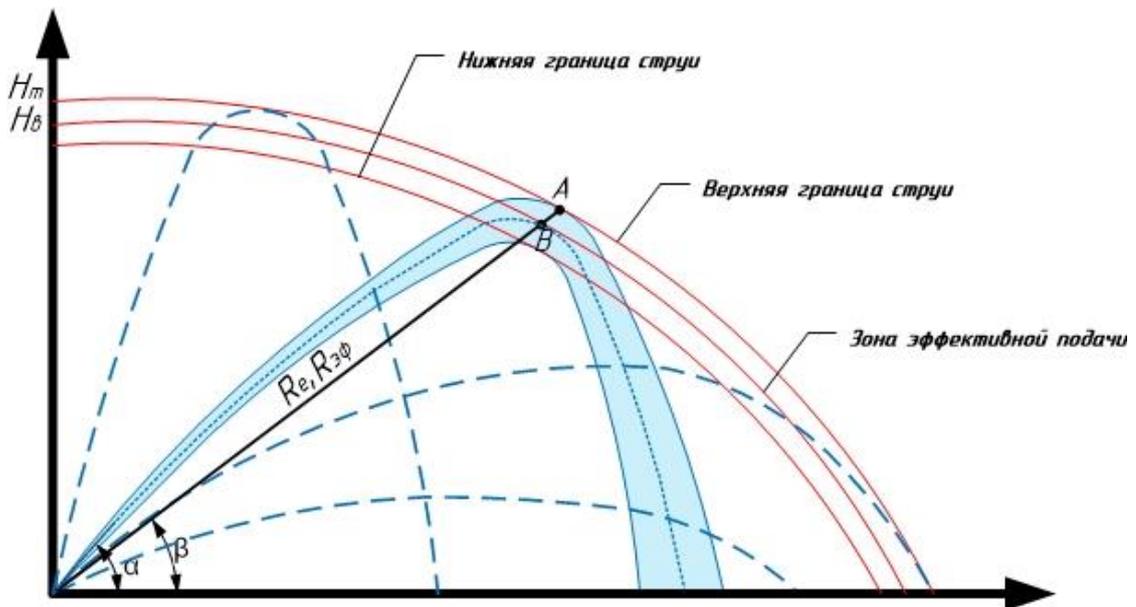


Рисунок 2.16 – Траектория струи ОТВ

В практических задачах для расчета попадания струи ОТВ в необходимую точку (например, точка А на рисунке 2.16), необходимо знать давление и расход ОТВ перед конусным насадком. Вследствие чего основными исходными данными для расчета траектории струи конусного насадка является радиус действия струи R_e и угол наклона β . Если перемещать точку А по огибающей кривой (см. рисунок 2.16), то с уменьшением угла наклона β , прямая R_e будет увеличиваться. Вследствие чего была выведена эмпирическая формула зависимости H_e от R_e :

$$R_e = f \cdot H_e, \quad (2.35)$$

где f – эмпирический коэффициент, зависящий от угла наклона β (см. таблицу 2.1).

Наибольшая дальность полета струи наблюдается при угле наклона ствола 30° , а угол наклона радиуса действия β струи при этом равен нулю (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Зависимость коэффициент f от угла наклона β

Угол наклона β , °	90	75	60	45	30	15	0
Коэффициент f	1	1,03	1,07	1,12	1,2	1,3	1,4

Как видно на рисунке 2.17, огибающие кривые компактной струи пожарных стволов являются четвертью круга с радиусом R_k , который равен высоте компактной части вертикальной струи. Но, исходя из практических наблюдений и основываясь на источники [15, 16], можно сказать, что для конусных насадков больших диаметров (25 мм и больше), преимущественно для лафетных стволов, линия abc более вытянута вдоль горизонтальной оси X , как правило такие изменения зависят от расхода и «вытягивания» линии abc вдоль оси X , т. е. увеличивается дальность подачи компактной струи и она уже не равна высоте подачи компактной струи. Данное явление происходит при расходе пожарного ствола от 20 л/с и более. Это обуславливается тем, что вследствие увеличения объемного расхода, увеличивается массовый расход, а любое тело, обладающее массой, имеет энергию и при увеличении массы проходящего через насадок ОТВ увеличивается и его кинетическая энергия, при этом уменьшается воздействие сил тяжести пропорционально увеличению углу между строго вертикальной струей и наклонной струей к плоскости.

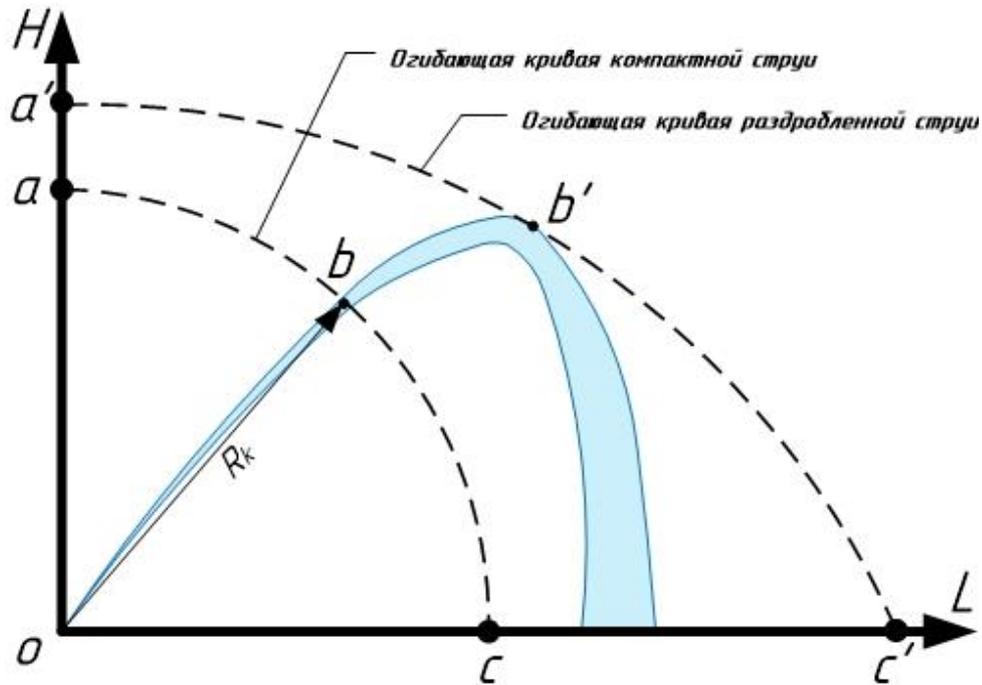


Рисунок 2.17 – Траектории сплошной и распыленной струи:

I – компактная струя; II – распыленная струя

Для определения траекторий компактной струи конусного насадка были также выведены эмпирические коэффициенты. Формула нахождения высоты компактной струи и дальности действия компактной струи:

$$H_K = f \cdot H_e, \quad (2.36)$$

где f – эмпирический коэффициент, зависящий от угла наклона β (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Зависимость коэффициент f от высоты струи H_e

H_e , м	7	10	15	20	25	30	35	40	45
Коэффициент f	0,84	0,83	0,82	0,8	0,77	0,73	0,69	0,65	0,62

Для более полной номенклатуры зависимости H_K от f и H_e требуется рассчитать эмпирические коэффициенты для разных показателей расхода.

Как видно из всего вышеизложенного, для определения баллистики струй ОТВ, выходящих из ствольной пожарной техники с конусным насадком, применялись формулы Люгера или Фримана по определению высоты вертикальной струи, далее путем ввода эмпирических коэффициентов, полученных при натурных испытаниях, находились точки траектории орошения струей огнетушащего вещества.

Так как в 2.2.1 было доказано, что универсальный насадок придает энергию струе воды намного больше, чем конусный насадок, то дальность полета ОТВ, выходящего из универсального насадка, будет намного дальше, чем у конусного.

Научным обоснованием баллистики струй огнетушащего вещества занимались такие ученые как Н.А. Тарасов-Агалаков [35], Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова [15–33]. Н.А. Тарасов-Агалаков сформировал общую концепцию, что струя ОТВ имеет три составные части: сплошная, раздробленная и распыленная, и в целом делал упор на обоснование напорно-расходных характеристик ствольной пожарной техники с коническими и коноидальными насадками, чем на обоснование баллистики струи. Ю.И. Горбань и Е.А. Синельникова, собрали широкий массив данных путем фотофиксации (рисунок 2.18) баллистики струи с шагом 3° по наклону оси ствола относительно горизонта и разными напорно-расходными характеристиками, применив формулы арифметической прогрессии создали программный комплекс по определению баллистики струи огнетушащих веществ (рисунок 2.19).



а



б

Рисунок 2.18 – Фотофиксация траектории струи [26]:

а – стелящаяся струя; *б* – струя с углом возвышения оси ствола

Данный подход к оценке баллистики струи имеет одно ограничение, связанное с тем, что эмпирически полученные данные были взяты с лафетных пожарных стволов с универсальным насадком производства ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР». Данные собирались с пожарных лафетных стволов, имеющих расход огнетушащих веществ 20, 40 и 60 л/с при

давлениях перед стволом от 0,4 до 0,8 МПа. Тогда как на сегодняшний день номенклатура производителей и непосредственно самих видов ствольной пожарной техники намного шире. Если опираться на данный эмпирический метод для оценки баллистики струи, то он будет очень трудозатратен и не совсем научен.

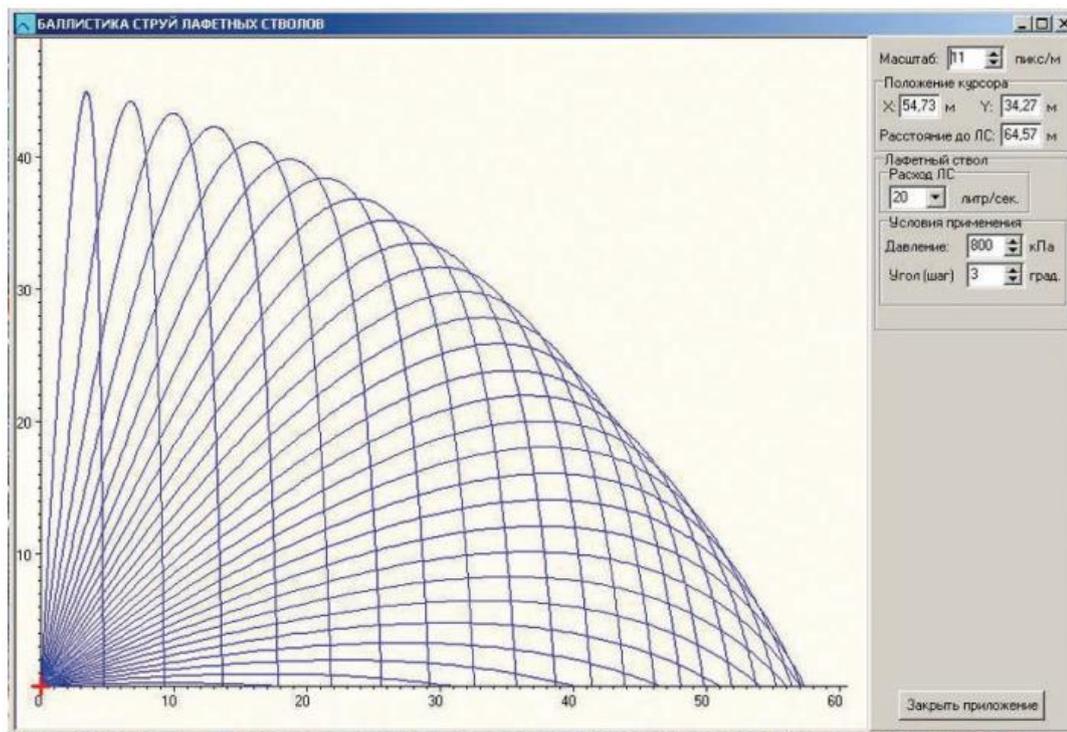


Рисунок 2.19 – Программный комплекс для расчета баллистики струи

Для более точной оценки баллистики струи – т. е. движения капли огнетушащего вещества (воды) в воздушном пространстве требуется более физическое обоснование. И первое, что необходимо знать для определения баллистики капли воды – это начальные граничные условия, в частности скорость выхода потока из среза ствола, гидравлический диаметр отверстия выхода потока, плотность сред и т. д., но в первую очередь необходимо знать скорость выхода ОТВ из ствола.

Для пожарных стволов с конусными насадками данный показатель можно выразить из формулы расхода жидкости для конусного насадка (1.2).

Зная расход (величину постоянную на всем протяжении от подводящего трубопровода до выходного отверстия ствола) и площадь поперечного сечения выходного отверстия, можно определить скорость капли воды на выходе.

Но на сегодняшний день, практически все пожарные стволы имеют универсальный насадок, т. е. выходное отверстие, у которого форма поперечного сечения – кольцо. Расчет скорости для данного сечения можно рассчитать из выведенной зависимости (2.4).

Определив начальную скорость потока на выходе из насадка ствола, можно рассчитать дальность полета струи с помощью уравнений, описывающих движение тела по траектории. Рассмотрим силы, которые действуют на тело, брошенное под углом к горизонту с начальной скоростью (см. рисунок 2.14).

На тело, брошенное под углом к горизонту, действуют следующие силы: F_T – сила тяжести и F_C – сила лобового сопротивления.

Сила лобового сопротивления воздуха направлена против скорости движения тела и определяется по зависимости:

$$\overline{F_C} = C_x \cdot \frac{\rho \cdot \overline{\vartheta}^2 \cdot S}{2}, \quad (2.37)$$

где C_x – безразмерный аэродинамический коэффициент сопротивления; ρ – плотность среды, кг/м³; ϑ – скорость тела, м/с; S – площадь поперечного сечения, м².

Сила лобового сопротивления воздуха для полета капли ОТВ оказывает значительное влияние на ее движение в пространстве. В теории принято выделять несколько составляющих для полной силы сопротивления, а именно:

- 1) сопротивление из-за трения среды;
- 2) сопротивление формы;
- 3) волновое сопротивление.

Так как ОТВ, которым в большинстве случаев является вода, имеет силу поверхностного натяжения, то агрегатное состояние в фазе полета в атмосфере будет являться шар, исходя из этого сопротивление воздуха из-за трения можно будет пренебречь. Критерий сопротивления формы – силы, возникающей из-за деформации потока при обтекании какого-либо тела, необходимо обязательно учитывать. Волновое сопротивление стоит учитывать лишь при движении при

около звуковых скоростях, что невозможно при движении капли ОТВ из ствольной пожарной техники.

В формуле (2.37) безразмерный аэродинамический коэффициент сопротивления C_x зависит от числа Рейнольдса и формы тела:

$$C_x = f(Re, \text{форма тела}). \quad (2.38)$$

Число Рейнольдса Re – это критерий подобия, который показывает, насколько силы инерции превосходят силы вязкости:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2.39)$$

где V – скорость потока воздуха, который обтекает каплю, м/с; d – диаметр капли, м²; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Для реального полета капли в воздухе значение числа Re колеблется в пределах нескольких сотен тысяч. Экспериментально установлено (рисунок 2.20), что со значением числа Re равным 10^4 – 10^5 можно считать коэффициент сопротивления C_x равный 0,047. На рисунке 2.20 видно, что данный показатель может быть еще более уточненным (провал кривой между значениями 10^5 и 10^6), но в рамках решения задачи по полету капли в воздухе данные уточнения не нужны.

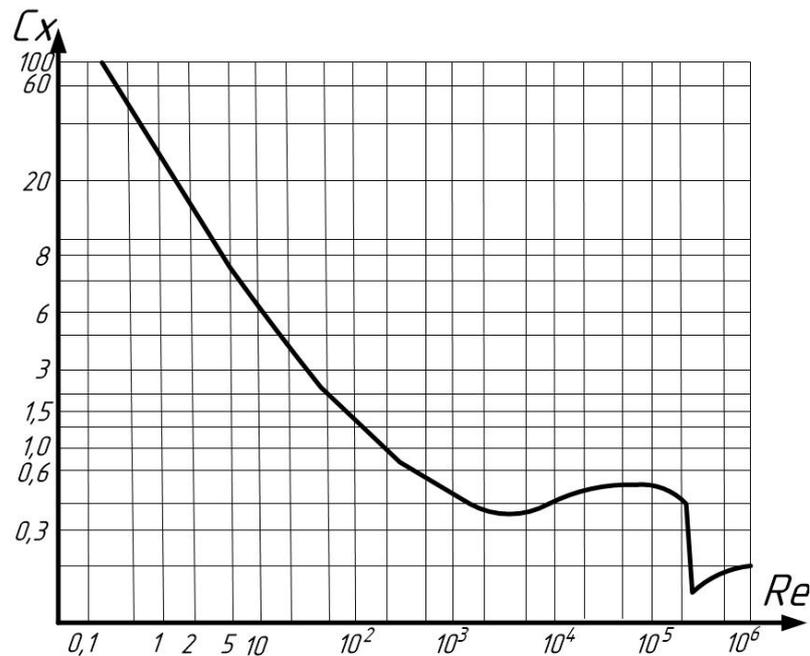


Рисунок 2.20 – Зависимость числа Re от C_x для шара

Под величиной S (2.37) понимается эффективная площадь сопротивления, для сферы или шара это площадь сечения или площадь окружности.

Сила тяжести соответственно определяется следующими уравнениями:

$$\overline{F}_T = m \cdot \overline{g}, \quad (2.40)$$

где m – масса тела, кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

При этом по закону Ньютона, сумма всех действующих сил на тело определяется как:

$$\sum \overline{F} = m \cdot \overline{a}, \quad (2.41)$$

где a – ускорение тела, м/с².

Далее, определив начальную скорость потока на выходе из насадка ствола, можно рассчитать дальность полета струи с помощью уравнений, описывающих движения тела по траектории.

Разложив силы на составляющие по координатным осям, для определения траектории движения тела необходимо решить систему двух уравнений:

$$\begin{cases} S_x(t) = - \iint \frac{F_{Cx}}{m} \cdot dt^2 \\ S_y(t) = - \iint \frac{(F_{Cx} + F_T)}{m} \cdot dt^2 \end{cases} \quad (2.42)$$

В каждом уравнении получится комплекс, который отвечает за соотношение силы сопротивления к массе, если остановиться на этом подробнее и приняв исходные данные плотности воздуха 1,22 кг/м³ и воды (как основного вида ОТВ) 1000 кг/м³, а эффективная площадь сопротивления – πR^2 , то получится следующая зависимость:

$$\frac{F_{Cx}}{m} = \frac{2 \cdot C_x \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot \pi R^2 \cdot V^2}{\rho_{\text{вод}} \cdot V_{\text{кап}}}. \quad (2.43)$$

Подставив данные, получится следующее решение:

$$\frac{F_{Cx}}{m} = \frac{C_x \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot \pi R^2 \cdot V^2}{\rho_{\text{вод}} \cdot V_{\text{кап}}} = \frac{2 \cdot 0,047 \cdot 1,22 \cdot \pi R^2 \cdot V^2}{1000 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{0,86 \cdot V^2}{R} \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Как видно из решения уравнения (2.43), радиус капли находится в знаменателе, отсюда можно сделать важный вывод, что по мере увеличения капли ОТВ, которая выходит из ствольной пожарной техники, то ускорение торможения

вследствие действий сил сопротивления уменьшается, т. е. чем больше капля, тем меньше она тормозится воздухом и тем дальше летит. Этим и объясняется практический вопрос: почему лафетные стволы, имеющие большой расход ОТВ имеют дальность подачи в 2–2,5 раза больше, чем пожарные ручные стволы. При этом на сегодняшний день в Российской Федерации производятся возимые лафетные стволы, которые по заявлениям производителей имеют дальность до 130 м. Данный показатель теоретически можно превзойти, увеличив пропускную способность, т. е. расход ствола, тем самым обеспечив наибольший диаметр капли шара, но также необходимо сохранить и скоростные показатели потока ОТВ. Но с увеличением поперечного сечения потока уменьшается его скорость, для поддержания заданной скорости потока необходимы мощные насосные установки, тогда в теории дальность полета ОТВ при высоких показателях расхода может быть намного дальше, и будет зависеть в первую очередь от мощности насосных установок [102].

При решении задачи необходимо принять допущение, что выходящая капля имеет форму шара с диаметром равным диаметру выходного сечения насадка. Во время полета струя не распадается на капли. Исходя из этого рассчитывается максимальная дальность полета струи.

Также необходимо учитывать, что для универсального насадка, в котором инверсией струи на выходе является кольцо (рисунок 2.21) возможно применить формулу гидравлического диаметра (эквивалентного) (2.44), т. е. меры эффективности русла в пропускании потока жидкости, и она равняется такому диаметру трубы или насадка, которые создадут эквивалентное сопротивление потоку, что и русло с площадью сечения потока и смоченным периметром:

$$D_{\Gamma} = \frac{4 \cdot 0,25\pi(D^2 - d^2)}{\pi(D + d)} = D - d, \quad (2.44)$$

где D – внешний диаметр кольцевого зазора, м; d – внутренний диаметр кольцевого зазора, м.

Для подтверждения выведенной теории баллистики струи была проведена серия натурных испытаний (рисунок 2.22). Для испытаний был выбран лафетный ствол с универсальным насадком при следующих начальных условиях:

- 1) эквивалентный диаметр – 29 мм;
- 2) давление перед насадком 0,6 МПа;
- 3) скорость потока на выходе – 35 м/с (скорость посчитана при помощи численного моделирования в программе *Ansys Fluent* [94–96]);
- 4) угол наклона ствола относительно горизонта – 30 °;
- 5) высота среза насадка ствола от горизонта – 1 м.

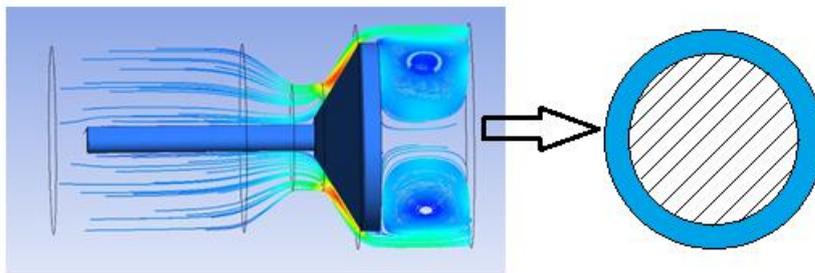


Рисунок 2.21 – Выходное сечение универсального насадка в виде кольца

Эксперимент проводили при температуре 30 °С и попутном движении струи, скорости ветра – 2 м/с.



Рисунок 2.22 – Экспериментальная оценка баллистики струи

На основе вычислений (2.42) были произведены расчеты и построены кривые в программном продукте MATLAB, при тех же начальных условиях. Экспериментальная кривая (кривая 1 на рисунке 2.23), построенная на основе экспериментальных измерений, показала дальность полета ОТВ 65 м при возвышении 13,5 м. Расчетные данные показали, что дальность струи

(кривая 2 на рисунке 2.23) составила 64 м, данный показатель находится в пределах 3 % погрешности, кроме этого, в ходе испытаний присутствовал ветер со скоростью 2 м/с, что также могло повлиять на небольшое отклонение.

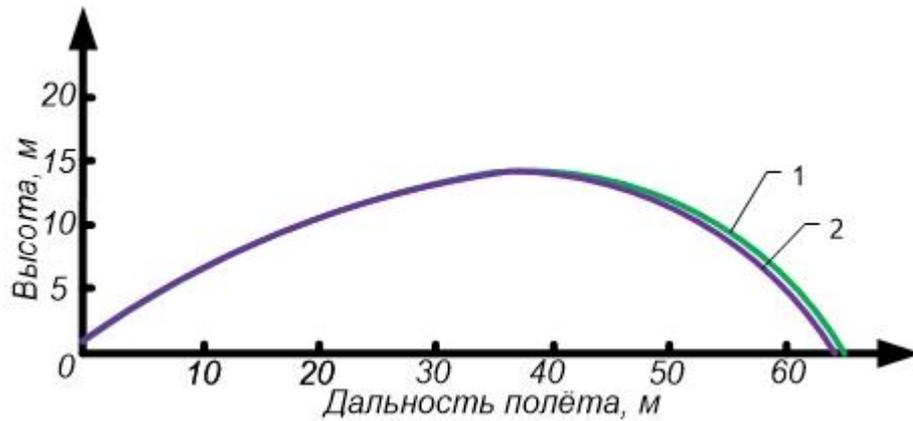


Рисунок 2.23 – Сравнение экспериментальных исследований и расчета:

1 – эксперимент; 2 – расчет

Стоит отметить, что при получении зависимостей было выявлено, что на дальность полета струи сильное влияние оказывает незначительное (десятые доли) изменение плотности среды [103]. На рисунке 2.24 присутствует вторая кривая, для струи при плотности воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$, такая плотность воздуха соответствует температуре окружающей среды -0 . При тех же начальных условиях, но при меньшей температуре окружающей среды струя огнетушащего вещества полетит на 3 м меньше, чем при температуре воздуха $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

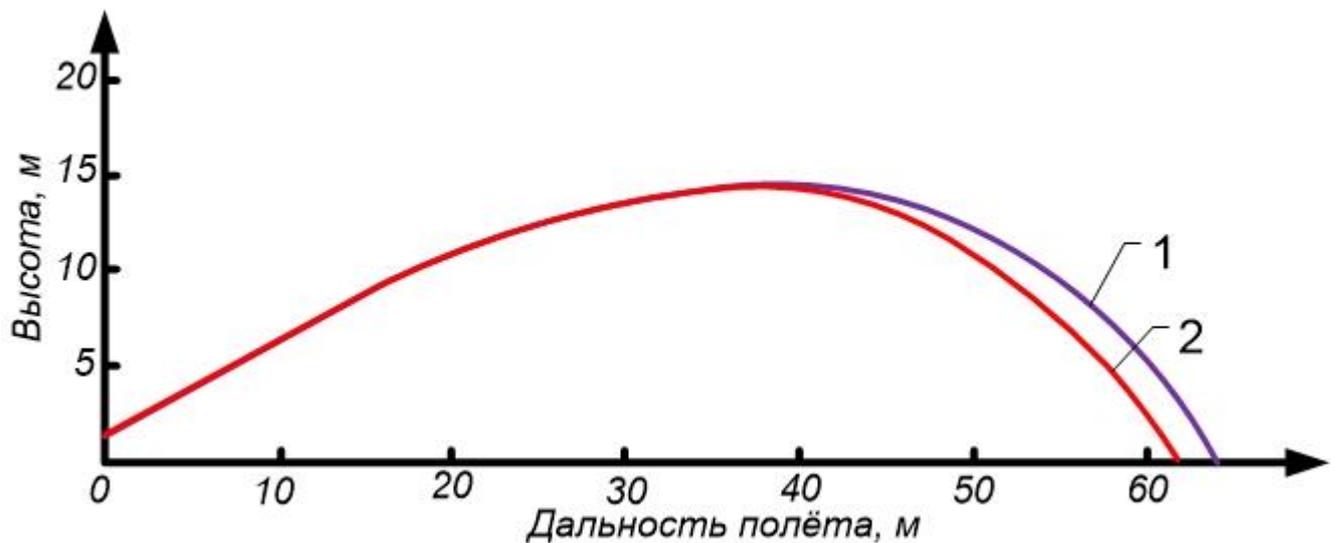


Рисунок 2.24 – Изменение дальности полета струи в зависимости от плотности воздуха:

1 – плотность воздуха $1,16 \text{ кг/м}^3$ (64,1 м); 2 – плотность воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$ (61,4 м)

Данные по плотности воздуха в зависимости от температуры приведены в таблице 2.7.

Плотность воздуха при температуре 0 и 30 °С составляет 1,29 и 1,16 кг/м³ соответственно [103], а учитывая тот факт, что установки пожаротушения на базе лафетных стволов могут устанавливаться в разных широтах России, где температура воздуха варьируется от –50 до 50 °С, то показатель баллистики струи может варьироваться в пределах 8–10 м. Данный показатель сильно может повлиять на качество и в целом на эффективность тушения пожара.

Таблица 2.7 – Плотность воздуха в зависимости от температуры [103]

t, °С	ρ, кг/м ³	t, °С	ρ, кг/м ³
-50	1,584	-10	1,342
-45	1,549	0	1,293
-40	1,515	10	1,247
-35	1,484	15	1,226
-30	1,453	20	1,205
-25	1,424	30	1,165
-20	1,395	40	1,128
-15	1,369	50	1,093

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать выводы, что:

- 1) разработанная методика расчета баллистики струи полностью коррелируется с натурными показателями;
- 2) из-за необходимости определения скорости истечения из универсального насадка, с кольцевым щелевым зазором (и другими нестандартными насадками: коноидальный, конический) методом численного моделирования, процесс расчета баллистики струи становится трудоемким, что требует в будущем разработку табличных значений скорости истечения ОТВ из разных насадков в зависимости от давления и расхода;
- 3) при внедрении данного метода расчета баллистики струи в системы наведения на очаг пожара роботизированных установок пожаротушения на базе лафетных стволов требуется учитывать температурные показатели окружающей среды в месте их применения.

2.2.3 Исследование и обоснование геометрических параметров воздушно-пенного насадка для ствольной пожарной техники

Предыдущие исследования [90, 104] показывают, что одним из главных факторов, характерных для процесса получения пены для тушения пожаров, служит показатель предельного давления, под которым раствор пенообразователя и воды подается в генератор пены. При превышении 5–6 атм возможен срыв пенообразования. Однако испытания воздушно-пенных и лафетных стволов с пенными насадками при давлении раствора пенообразователя более 6 атм, а именно 10 атм, показывают, что на этих стволах пенообразование происходит.

Так как пена – двухфазная дисперсная структура, состоящая из раствора пенообразователя и воздуха [90], для ее формирования используется эжекционный пенный насадок, т. е. воздух для формирования пены подсасывается через отверстия в начале насадка, за счет эффекта Вентури (рисунок 2.25).

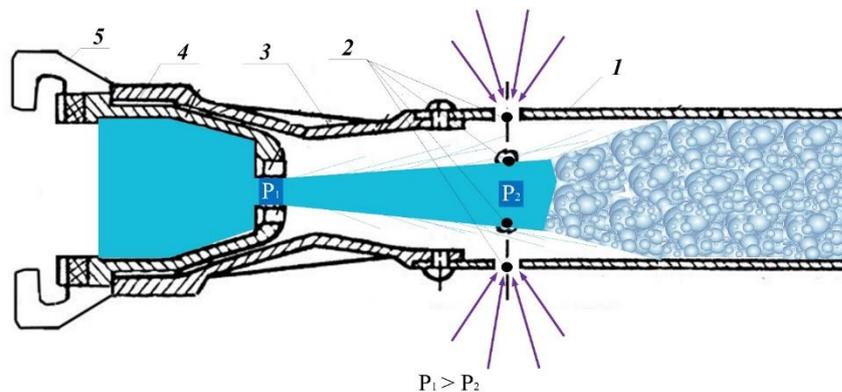


Рисунок 2.25 – Эффект Вентури создаваемый в ручных стволах линейки СВП:

1 – корпус пенного насадка; 2 – отверстия в пенном насадке, для подсоса воздуха; 3 – диффузор; 4 – сопло; 5 – соединительная головка

На сегодняшний день компании-производители ствольной техники, при производстве средств подачи пены низкой кратности вынуждены пользоваться экспериментальным методом при конструировании стволов воздушно-пенных или лафетных стволов с пенным насадком.

Для обоснования геометрических параметров воздушно-пенных насадков схематично изображен процесс всасывания воздуха в струю ОТВ (рисунок 2.26).

Для решения данной задачи можно выделить два сечения (разреза): сечение I-I, где поток ОТВ выходит из корпуса водной части ствола, а также сечение II-II, где с определенными показателями давления и скорости потока также движется вода. При этом в двух сечениях установлены два манометра (M_1 и M_2) показывающие относительное давление.

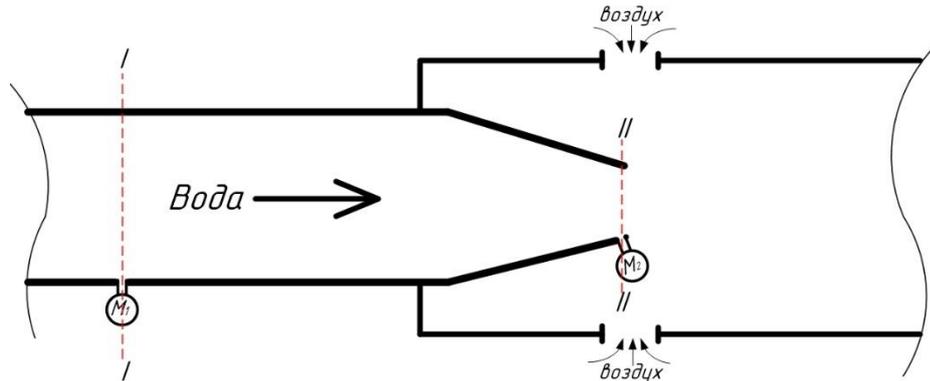


Рисунок 2.26 – Схема движения ОТВ и воздуха в пенном насадке

Исходя из того, что сечение II-II меньше, чем сечение I-I, то скорость потока там будет выше, следовательно, показания манометра M_2 будут меньше, чем показания манометра M_1 . Исходя из того, что в практике показания давления перед стволом всегда известны, т. е. показатели манометра M_1 , то можно из уравнения Бернулли найти показатели разрежения в сечении II-II, т. е. показатели разрежения струи, которая затягивает воздух к струе раствора воды и пенообразователя.

По уравнению Бернулли как частного обобщения закона сохранения энергии при подаче ОТВ будет соблюдаться следующее равенство:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2}, \quad (2.45)$$

где P_1 – давление в напорной линии перед стволом, Па; ρ_1 – плотность ОТВ, кг/м³; V_1 – скорость потока ОТВ на входе в ствол, м/с; P_2 – давление на срезе сопла с ОТВ, Па; V_2 – скорость потока ОТВ на срезе ствола, м/с.

Исходя из этого разница давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ будет равна:

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2). \quad (2.46)$$

В данном уравнении можно учитывать, что плотность раствора пенообразователя и воды (ОТВ) равна около 1000 кг/м^3 . По закону сохранения массы показатели расхода ОТВ для сечений I-I и II-II (см. рисунок 2.26) будут равны, следовательно, скорости потоков будут равны:

$$V_{1,2} = \frac{Q}{\omega_{1,2}}, \quad (2.47)$$

где Q – расход ОТВ, $\text{м}^3/\text{с}$; ω – площадь поперечного сечения, м^2 ;

Тогда ΔP будет равно:

$$\Delta P = 500 \cdot \left(\left(\frac{Q}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{Q}{\omega_1} \right)^2 \right). \quad (2.48)$$

Преобразовав площадь поперечных сечений (ω) сопла воздушно-пенного ствола в гидравлический диаметр с помощью формулы $\frac{\pi \cdot d^2}{4}$, уравнение получит следующий вид:

$$\Delta P = \frac{8 \cdot Q^2 \cdot 10^{-3}}{\pi^2} \cdot \left(\frac{d_1^4 - d_2^4}{d_2^4 \cdot d_1^4} \right), \quad (2.49)$$

где Q – расход ОТВ, $\text{м}^3/\text{с}$; d_1 – гидравлический диаметр потока ОТВ на входе в ствол, м^2 ; d_2 – гидравлический диаметр потока ОТВ на выходе из сопла ствола, м^2 .

Если рассмотреть рисунок 2.26 и использовать вышеуказанные выведенные уравнения, то манометр M_2 будет показывать величину P_2 , т. е. показания разряжения, создаваемые струей ОТВ (обозначим данный показатель $h_{\text{разр}}$):

$$h_{\text{разр}} = P_2 = P_1 - \Delta P = P_1 - \frac{8 \cdot Q^2 \cdot 10^{-3}}{\pi^2} \cdot \left(\frac{d_1^4 - d_2^4}{d_2^4 \cdot d_1^4} \right), \quad (2.50)$$

где P_1 – давление перед стволом с водопенным насадком, Па

Далее необходимо рассмотреть водопенный насадок как водовоздушный эжектор с пассивным потоком воздуха. Если смотреть на пожарный ствол с водопенным насадком, как на работу системы водовоздушного эжектора, то в данной системе можно выделить также 2 сечения (I-I и II-II) (рисунок 2.27), где через сечение I-I выходит струя ОТВ под определенным давлением ($P_{\text{ОТВ}}$) и расходом ($Q_{\text{ОТВ}}$) создавая разряжение, сечение II-II, через которое в пенный

насадок заходит воздух под действием сил разряжения создаваемой струей ОТВ ($P_{\text{возд}} = h_{\text{разр}}(2.50)$) и с определенным расходом ($Q_{\text{возд}}$).

Как правило, в практике применения инженерами и проектировщиками уже известны величины давления и расхода ОТВ, но рассчитать количество подсосываемого воздуха затруднительно, в то время как именно количество воздуха влияет на кратность пены (2.54). Поэтому на сегодняшний день все разработанные воздушно-пенные насадки изготовлены эмпирическим методом подбора отверстий в них для создания воздушно-механических пен требуемой кратности.

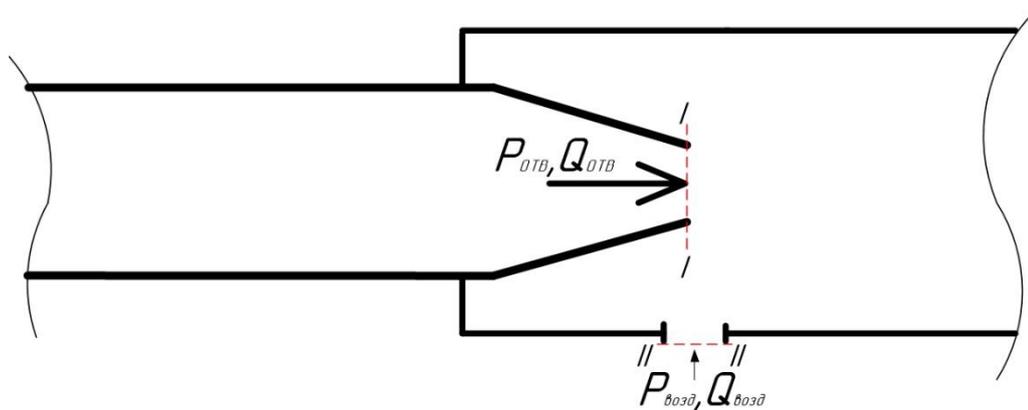


Рисунок 2.27 – Воздушно-пенный насадок

Главная сложность подбора размеров подсосываемых отверстий насадка заключается в том, что при истечении ОТВ с разными напорно-расходными характеристиками создаются разные показатели разряжения (2.50), при разряжении в процессе подсосывания воздуха меняется его плотность, также необходимо учитывать температуру этого воздуха. Разные плотности воздуха и сразу несколько показателей, влияющих на эту температуру, не позволяют обеспечить расчёт точного расхода воздуха при подсосывании его через отверстие ($Q_{\text{возд}}$, см. рисунок 2.27).

Объемные расход подсосываемого воздуха можно найти по формуле:

$$Q_{\text{возд}} = F \cdot V, \quad (2.51)$$

где F – суммарная площадь условного прохода воздуха, м^2 ; V – скорость воздушного потока, м/с ;

Скорость воздушного потока можно выразить из формулы динамического давления воздушного потока характеризует его кинетическую энергию в сечении:

$$V_{\text{возд}} = \sqrt{\frac{2 \cdot h_{\text{разр}}}{\rho}}, \quad (2.52)$$

где $h_{\text{разр}}$ – разряжение создаваемое струей сопла ствола, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Плотность воздуха есть масса единицы объема воздуха. По уравнению Клайперона плотность чистого воздуха можно найти по формуле:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}, \quad (2.53)$$

где P – динамическое давление воздуха в отверстии, Па (для расчет применяется показатель $h_{\text{разр}}$ (2.50)), Па; R – газовая постоянная, равная для воздуха 286,7 Дж/(кг·К); T – температура воздуха, К.

Данная формула полностью коррелируется с выведением зависимостей по подсосу воздуха в отверстия воздушно-пенного насадка, ведь, согласно закону Бойля – Мариотта, плотность воздуха будет тем больше, чем больше давление при увеличении скорости потока ОТВ, вследствие подсоса воздуха увеличивается и динамическое давление со стороны атмосферы и при постоянном значении температуры воздуха его плотность увеличивается.

Подставив все данные в формулу (2.51), можно найти расход подсасываемого воздуха при определенных напорно-расходных показателях ОТВ сопла ствола и спроектировать пожарный ствол с воздушно-пенным насадком, который обеспечит требуемую кратность воздушно-механической пены. Так, кратность воздушно-механической пены можно найти по формуле:

$$K = \frac{W_{\text{пена}}}{W_{\text{р-ра}}}, \quad (2.54)$$

где $W_{\text{пена}}$ – объем полученной воздушно-механической пены, м³; $W_{\text{р-ра}}$ – объем раствора воды и пенообразователя, затраченный для получения воздушно-механической пены, м³.

Объем пены – есть суммарный объем раствора ($W_{\text{р-ра}}$) пенообразователя и воздуха $W_{\text{возд}}$:

$$K = \frac{W_{p-ра} + W_{возд}}{W_{p-ра}}. \quad (2.55)$$

Зная расход ОТВ и применив выведенные зависимости (2.46–2.55), возможно найти теоретическую кратность пены, получаемую разрабатываемым воздушно-пенным насадком, приняв допущение: ствол с воздушно-пенным насадком работает в установившемся режиме истечения ОТВ (данное допущение позволяет принять показатели объемного расхода ($\text{м}^3/\text{с}$) как показатели объема). Стоит учитывать, что здесь говорится о теоретической кратности пены, при практической разработке стоит учитывать марку пенообразователя, а также такие физические процессы, как барботирование и синерезис пены.

На основе выведенных зависимостей были разработаны воздушно-пенные насадки для образования воздушно-механической пены с кратностью от 5 до 20 (рисунки 2.28, 2.29).



Рисунок 2.28 – Лафетный ствол с воздушно-пенным насадком, имеющим расход раствора пенообразователя 20 л/с



Рисунок 2.29 – Лафетный ствол с воздушно-пенным насадком, имеющим расход раствора пенообразователя 80 л/с

При этом для наибольшей дальности подачи низкократной воздушно-механической пены, воздушно-пенные насадки были удлинены, а для насадка к лафетному стволу с расходом 80 л/с сделано заужение в конце для увеличения скорости двухфазного потока в виде низкократной воздушно-механической пены, а вследствие чего и увеличения дальности полета ОТВ.

Получение зависимости в данном разделе позволяет в дальнейшем конструировать воздушно-пенные насадки ствольной пожарной техники для образования воздушно-механической пены требуемой кратности с учетом требований пожаротушения при проектировании систем пожаротушения.

2.3 Исследование и внедрение технологии осциллирования при использовании ствольной пожарной техники

Исследования баллистики струй и гидравлических характеристик ствольной пожарной техники с универсальным и водопенным насадком показали, что применение результатов исследований повысят эффективность ствольной пожарной техники на объектах защиты.

Для более эффективного применения ствольной пожарной техники на сегодняшний день возможно применение технологии осциллирования.

Осциллирование – схема работы ствольной пожарной техники, при которой производится непрерывная, повторяющаяся подача ОТВ по заданной амплитуде колебаний оси пожарного ствола. Амплитуда колебаний пожарного ствола задается за счет применения осциллирующего устройства, которое работает за счет кинематики рычагов, на которые приходит крутящий момент по трансмиссии от оси турбины (рисунок 2.30). Турбина работает от потенциальной или кинетической энергии потока ОТВ в подводящем трубопроводе, в зависимости от вида осциллирующего устройства

Одним из самых главных преимуществ применения осциллирующего устройства является то, что при его работе дополнительного контроля со стороны обслуживающего персонала (операторов) за движением устройств подачи огнетушащих веществ не требуется.

Осциллирующие устройства ствольной пожарной техники можно классифицировать по частоте колебаний (скорости осциллирования), по показателям угла орошаемой площади, и самое главное по виду осциллирующего устройства. Осциллирующие устройства могут быть двух видов: закрытые и открытые. В закрытых поток ОТВ раскручивает турбину, после передачи своей энергии лопастям проходит дальше, в открытых же осциллирующих устройствах после передачи энергии лопастям турбины некоторая часть ОТВ выходит в атмосферу.

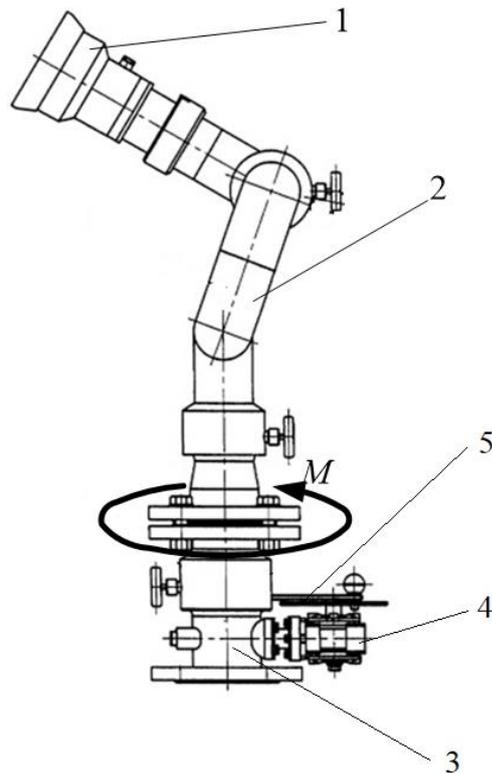


Рисунок 2.30 Лафетный ствол установленным закрытым осциллирующим устройством:
 1 – универсальный насадок; 2 – трубопровод пожарного ствола; 3 – корпус с установленной турбиной и червячной передачей для редуктора; 4 – редуктор; 5 – рычаги

Осциллирующее устройство закрытого типа, обеспечивает автоматическое перемещение ствольной пожарной техники, предназначенной для подачи огнетушащих веществ в предварительно заданном секторе на 360° по горизонтальной плоскости. Осциллятор работает за счет энергии потока огнетушащего вещества, проходящей через его корпус, без дополнительного расхода.

На сегодняшний день многие производители ствольной пожарной техники, как в Российской Федерации, так и за рубежом стали применять осциллирующие устройства для обеспечения пожарной безопасности на объектах различных отраслей промышленности [79–88].

Рассмотрев разные виды осциллирующих устройств отечественных и зарубежных производителей, можно сделать вывод, что при их изготовлении не было применено научного обоснования к изготовлению главной детали осциллирующего устройства – это турбины, мощность и крутящий момент для совершения колебательных движений ствольной пожарной техники передается от

нее. Также не была оценена баллистика струй при работе ствольной пожарной техники с осциллирующим устройством.

В данном разделе диссертации будут обоснованы геометрические параметры турбин осциллирующих устройств, сделаны выводы по целесообразности применения осциллирующего устройства, открытого или закрытого типа, а также выведены зависимости, влияющие на баллистику струи ствольной техники с осциллирующим устройством.

Так как главным элементом осциллирующего устройства является турбина, то требуется рассмотреть существующие виды гидравлических турбин. По классификации существующих турбомашин, турбина является двигателем, который преобразует энергию водного потока в механическую энергию. От вращающегося вала турбины энергия передается через трансмиссию на исполнительные механизмы.

По принципу работы, все гидротурбины разделяются на два класса – активные (импульсные) и реактивные. Рабочее колесо реактивных турбин полностью погружено в поток воды, в активных же турбинах рабочее колесо работает при атмосферном давлении и приводится в действие отдельными струями воды. Наиболее известные импульсные турбины – это турбина Пелтона, реактивные турбины – это турбины Френсиса и Каплана [105].

Активные турбины (импульсные) – это турбины, использующие только кинетическую энергию потока, рабочие органы которых работают без избыточного давления, открыто в атмосферной среде (осциллирующее устройство открытого типа).

Реактивные турбины – это гидротурбины, использующие потенциальную энергию давления, процесс преобразования энергии происходит в замкнутых, изолированных от окружающей среды объемах. Процесс преобразования энергии происходит при давлении на входе, превышающем атмосферное. При этом частично используется и скоростной напор [106]. (Осциллирующее устройство закрытого типа).

Наиболее распространенными активными (импульсными) гидротурбинами являются ковшовые. Вода из подводящего трубопровода через сопло поступает на лопасти рабочего колеса, выполненные в виде диска, закрепленного на валу, и вращается при атмосферном давлении. По окружности диска расположены ковшеобразные лопасти (ковши) (рисунок 2.31). На ковшах происходит преобразование гидравлической энергии, заключенной в струе, в механическую. Ковши равномерно распределяются по ободу рабочего колеса и последовательно один за другим при его вращении принимают струю.

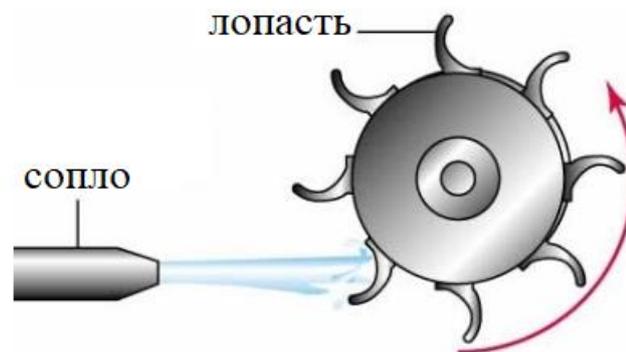


Рисунок 2.31 – Схема работы активной (импульсной) гидравлической турбины

Подвод воды к рабочему колесу осуществляется посредством сопла. В сопле вся энергия воды, подведенная к нему по трубопроводу, за вычетом потерь, обращается в кинетическую.

К реактивным гидротурбинам относятся: радиально-осевые, пропеллерные, поворотные-лопастные (включая двухперовую), и диагональные. Для реактивных турбин характерен основной признак – рабочее колесо располагается полностью в воде, поэтому поток воды отдает энергию одновременно всем лопастям рабочего колеса (рисунок 2.32).

Перед рабочим колесом только часть энергии воды находится в кинетической форме, остальная же – потенциальная энергия, соответствующая разности давлений до и после колеса.

Избыточное давление по мере прохождения воды по проточной части рабочего колеса турбины расходует напор потока на увеличение относительной скорости, т. е. на создание реактивного давления потока на лопасти. При этом

изменение направления потока за счет криволинейной поверхности лопастей турбины приводит к возникновению активного давления потока.

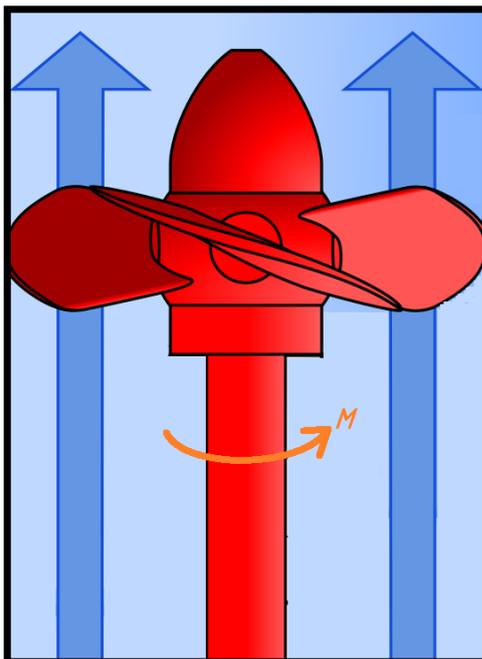


Рисунок 2.32 – Схема работы реактивной осевой гидравлической турбины

Таким образом, действие потока на лопасти рабочего колеса складывается из реактивного воздействия, возникающего из-за увеличения относительной скорости, и активного давления, возникающего из-за изменения направления потока [106].

Учитывая все вышеизложенное и геометрические особенности турбин, наиболее подходящие виды турбин для забора крутящего момента от энергии потока подводящего трубопровода противопожарного водоснабжения и создания осциллирующего устройства – это импульсная турбина Френсиса и реактивная осевая турбина Каплана. Турбина Френсиса не подойдет для создания осциллирующего устройства, так как для приведения ее в действие необходимы радиально-осевые потоки, что сложно создать в противопожарном трубопроводе подходящем к ствольной пожарной технике.

На сегодняшний день компания по производству ствольной пожарной техники Рок (Италия) создала переносной лафетный ствол с осциллирующим устройством на основе турбины Пелтона (рисунок 2.33). В данном лафетном стволе, поток ОТВ, забираемый из проточной части самого лафетного ствола, через сопло воздействует на ковшевые лопасти турбины осциллирующего

устройства, затем вытекает в атмосферу. Данный факт не совсем приемлем, так как в условиях электростанций может происходить утечка воды на электроведущие части. Так как разрабатываемые технологии применения ствольной пожарной техники в данной диссертационной работе предназначены для применения их на объектах энергетики, то в дальнейшем в работе будут проведены исследования по разработке осциллирующего устройства с осевой турбиной Каплана.



Рисунок 2.33 – Осциллирующее устройство открытого типа

Для забора максимальной энергии у потока ОТВ, у гидравлической осевой турбины Каплана оптимальный угол наклона лопастей должен быть $45\text{--}60^\circ$ относительно горизонтальной плоскости [106]. Основным геометрическим показателем турбины является ее диаметр. При этом мощность осевой турбины будет определяться по зависимости:

$$N = 9,81 \cdot \eta \cdot Q \cdot D^2 \cdot H \cdot \sqrt{H}, \quad (2.56)$$

где η – коэффициент полезного действия турбины, (0,9); Q – расход ОТВ, проходящий через турбину, $\text{м}^3/\text{с}$; D – диаметр турбины, м; H – напор перед турбиной, м.в.ст.

Далее по алгоритму расчета гидравлических машин возможно найти частоту вращения вала турбины по формуле:

$$n = n_1 \cdot \frac{\sqrt{H}}{D}, \quad (2.57)$$

где n_1 – КПД модели турбины по графику главной универсальной характеристики.

При проектировании гидравлических турбин показатель n_1 находится исходя из графика главной универсальной характеристики. На сегодняшний день

данные графики разработаны только для гидравлических турбин, применяемых на гидроэлектростанциях, для расходных показателей от 600 л/с. Для более низких расходов показатели отсутствуют, данный факт подтверждает актуальность научного исследования. Далее будет составлен график главной универсальной характеристики турбины осциллирующего устройства в зависимости от расхода и угла наклона лопастей.

Как было указано выше, для гидравлической осевой турбины Каплана оптимальный угол наклона лопастей должен быть $45\text{--}60^\circ$ относительно горизонта. Учитывая это, было разработано осциллирующее устройство, которое показано на рисунке 2.34.



Рисунок 2.34 – Осциллирующее устройство закрытого типа

Разработанное осциллирующее устройство (см. рисунок 2.34) состоит из:

- 1) корпуса направляющего трубопровода с установленными фланцами на концах для его установки между подводящим трубопроводом и пожарным стволом;
- 2) турбина с осью, на которой расположена червячная передача;
- 3) зубчатого колеса для забора крутящего момента от оси турбины и передачи его на редуктор;
- 4) редуктора;
- 5) площадки для установки рычажной системы;

Было разработано 3 модели осциллирующих устройств с диаметрами турбины 50, 60 и 80 мм (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Технические характеристики

Модель, мм	Рабочее давление, МПа	Диапазон расходов средства подачи, л/с	Высота Н, мм
50	0,3–1,6	5–40	165±2
60	0,3–1,6	20–60	170±2
80	0,3–1,6	40–100	210±5

Для определения мощности турбины, крутящего момента и частоты оборотов в зависимости от напорно-расходных характеристик подводящего противопожарного трубопровода был проведен ряд экспериментов с использованием видеофиксации. На разработанный стенд были установлены осциллирующие устройства и разработанные экспериментальные насадки для регулирования расхода, так как экспериментальные насадки имеют возможность подачи ОТВ только до 20 л/с, для более широкого диапазона расхода ОТВ также были установлены пожарные лафетные стволы обеспечивающие расход ОТВ от 20 до 80 л/с. Каждое разработанное осциллирующее устройство испытывалась с диапазоном расхода от 5 до 80 л/с, диапазоном напоров воды от 0,4 до 1 МПа и с разными углами наклона лопастей турбин.

При проведении эксперимента на видеосъемку фиксировалась частота оборотов площадки для установки рычажной системы, учитывая, что осциллирующее устройство работает по схеме, то зная передаточные числа между осью площадки, редуктором, осью, передающей крутящий момент на редуктор от шестеренчатого колеса и червячной передачи оси вала турбины, возможно найти частоту оборотов турбины в зависимости от напорно-расходных характеристик и геометрических характеристик турбины.

Общее передаточное число от площадки к турбине определяется по формуле:

$$U_{общ} = u_p \cdot u_t, \quad (2.58)$$

где u_p – передаточное число редуктора; u_t – передаточное число между валом турбины и шестерней оси редуктора.

Зная частоту вращения вала турбины возможно определить КПД модели турбины для построения графика главной универсальной характеристики турбины:

$$n_I = \frac{D \cdot n}{\sqrt{H}}. \quad (2.59)$$

С учетом рассчитанных данных строится график главной универсальной характеристики турбины для гидравлических осевых турбин осциллирующих устройств (рисунок 2.35). Данный график может являться номенклатурным для расчета осциллирующих устройств при расчетах расстановки ствольной пожарной техники в машинных залах для защиты ферм перекрытия без участия человека.

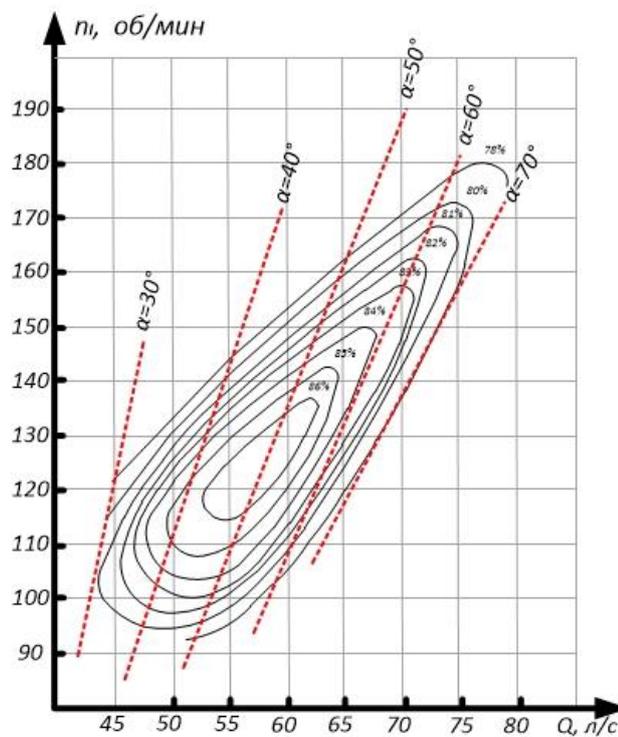


Рисунок 2.35 – График главной универсальной характеристики осевой турбины осциллирующего устройства

Определив мощность и частоту оборотов вала турбины, возможно определить крутящий момент на валу турбины:

$$M = \frac{N \cdot 9550}{n}. \quad (2.60)$$

Кроме этого, необходимо принять во внимание то, что в зубчатых передачах между осью турбины и осью площадки для установки поворотных рычагов образуются потери крутящего момента. Для определения крутящего момента вала

поворотной площадки, были проведены эксперименты с использованием динамометра. Также при разных напорно-расходных характеристиках и разных разработанных турбинах измерялись усилия в местах крепления рычагов на площадке и расчет крутящего момента на валу поворотной площадки, который определялся по формуле:

$$M = F \cdot l, \quad (2.61)$$

где F – усилие создаваемое поворотной площадкой, Н; l – расстояние от проекции оси поворотной площадки до места приложения усилия (место установки рычага), м.

Вследствие применения вышеуказанных расчетов возможно учитывать крутящий момент, создаваемый осциллирующим устройством, и, исходя из показателя l наносить точки крепления рычага колена на поворотной площадке осциллирующего устройства.

При этом сила обратной реакции струи должна быть такой величины, чтобы создаваемый крутящий момент на трубопроводе лафетного ствола был меньше, чем крутящий момент, создаваемый поворотной площадкой осциллирующего устройства во всем диапазоне вращения.

Ю.Г. Абросимов [36] в своих трудах описывал силу обратной реакции струи аналитическим уравнением:

$$F = -2 \cdot P \cdot \omega, \quad (2.62)$$

где P – давление перед стволом, Па; ω – площадь поперечного сечения струи при выходе из ствола, м².

В трудах Ю.И. Горбаня [15] описывается сила обратной реакции струи для универсальных насадков в следующем виде:

$$F = 1,38 \cdot Q \sqrt{P}, \quad (2.63)$$

где P – давление перед стволом, кгс/см²; Q – расход ствола, л/с.

При этом за начальные условия аналитических уравнений (2.62) и (2.63) выдвинута гипотеза, что при истечении ОТВ из ствола сила обратной реакции струи действует на окончание ствола, т. е. на стенки ствола (рисунок 2.36).

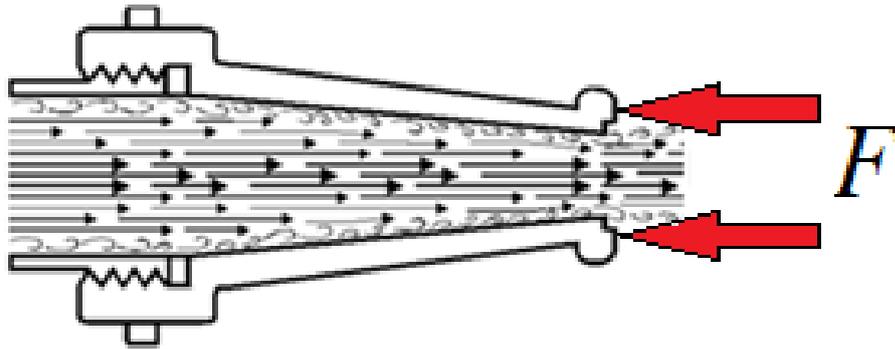


Рисунок 2.36 – Действие силы обратной реакции струи [15, 36]

Физически такое невозможно, ведь если мысленно на конусный насадок, представленный на рисунке 2.36 сверху одеть примерно схожий по форме конусообразный предмет, то по выдвинутой теории [36], исходя из того, что силы обратной реакции струи будут действовать на край насадка ствола, надетый сверху конус должен прижиматься. Конечно, такое невозможно, и, надетый конус сверху на конусный насадок от действия сил давления струи слетит.

Силы обратной реакции струи ствола действуют не на насадок ствола, а на источник энергии, который передает потоку ОТВ эту энергию. В пожарных насосно-рукавных системах чаще всего этим источником энергии является крыльчатка рабочего колеса насоса. То, что при работе ручным пожарным стволом пожарного начинает толкать назад, это не сила, которая направлена на насадок ствола, а сила, которая действует на первый изгиб в пожарном рукаве или трубопроводе. В стационарных установках пожаротушения на базе лафетных стволов с функцией осциллирования возникает крутящий момент из-за того, что сила обратной реакции струи (F) ударяется в изгиб трубопровода ствола, который находится на расстоянии l от центральной оси самого лафетного ствола (рисунок 2.37).

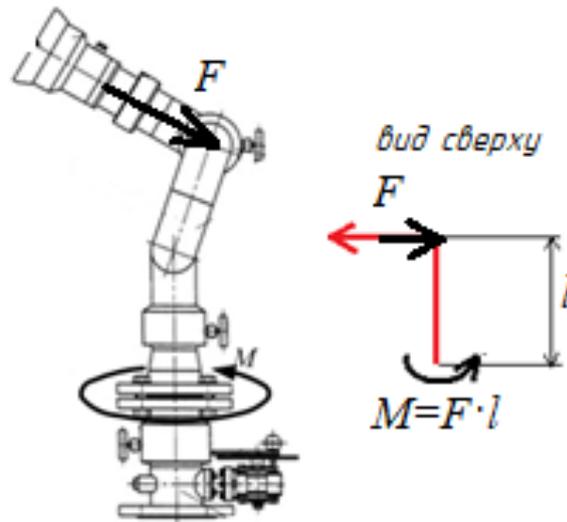


Рисунок 2.37 – Крутящие моменты, создаваемые при работе системы «осциллирующее устройство – пожарный лафетный ствол»

После обоснования места приложения силы обратной реакции струи в ствольной пожарной технике требуется обоснование как ее найти и от каких показателей она зависит.

Для того чтобы найти силу обратной реакции струи, необходимо использовать второй закон Ньютона, который в классической постановке записывается как отношение импульса по времени:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad (2.64)$$

где Δp – изменение импульса потока ОТВ, кг·м/с; t – время, с.

При установившемся истечении ОТВ из насадка, у потока стабилизируется скорость, отсюда следует:

$$F = \frac{V \cdot \Delta m}{\Delta t}, \quad (2.65)$$

где Δm – изменение массы ОТВ, кг;

Изменение массы во времени можно представить как массовый расход $G = \frac{\Delta m}{\Delta t}$, переводя его в объемный, сила будет равна:

$$F = \rho \cdot Q \cdot V, \quad (2.66)$$

где Q – объемный расход, м³/с; V – скорость истечения ОТВ, м/с

При этом, если расписать объемный расход как произведение площади поперечного сечения проточной части насадка ствола S и скорости потока V , окончательно получится выражение:

$$F = \rho \cdot S \cdot V^2, \quad (2.67)$$

где ρ – плотность ОТВ, кг/м³; S – площадь поперечного сечения струи, м².

С помощью выведенного аналитическим способом уравнения (2.67) можно найти силу обратной реакции струи, возникающей при истечении ОТВ из насадка ствола.

Также при проведении исследования технологии осциллирования, баллистики струи ОТВ, выявлено: струя ОТВ при движении имеет не только изгибающую форму (рисунок 2.38), но и дальность подачи ОТВ увеличивается, нежели при работе точно такого же лафетного ствола со стационарной неподвижной позиции.



Рисунок 2.38 – Подаваемая струя при работе осциллирующего устройства с лафетным стволом

В данном случае полет капли струи ОТВ является сложным движением точки, т. е. движением, при котором точка (в данном случае капля) движется относительно двух систем отсчета – подвижной (ось ствола от привода

осциллирующего устройства) и неподвижной (поверхность орошения). В данном случае можно выделить три вида движения (рисунок 2.39):

- абсолютное – движение капли ОТВ относительно поверхности орошения (земли);
- относительное – движение капли ОТВ относительно подвижной оси ствола;
- переносное – движение оси ствола относительно поверхности орошения (земли);

В данной подзадаче раздела абсолютное движение обозначим индексом «абс», относительное – «о», переносное – «п».

При сложном движении воды в пространстве ее абсолютная скорость в любой момент времени геометрически складывается из относительной и переносной скоростей.

$$V_{абс} = V_o + V_{п}, \quad (2.68)$$

где $V_{абс}$ – абсолютная скорость, м/с; V_o – относительная скорость, м/с; $V_{п}$ – переносная скорость, м/с.

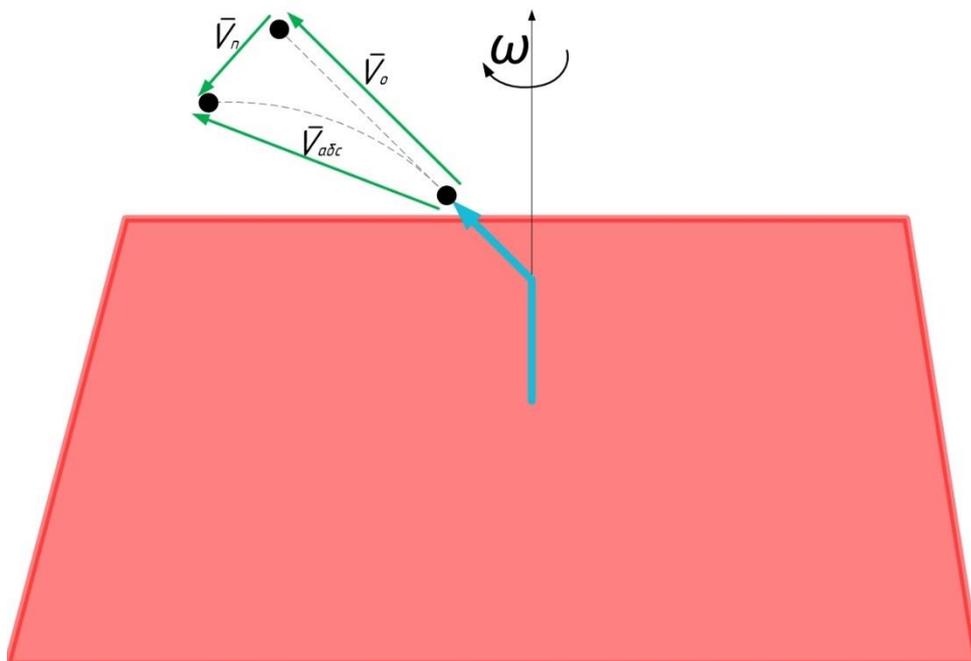


Рисунок 2.39 – Геометрическое описание сложного движения капли ОТВ при работе осциллирующего устройства с определенной частой вращения

Относительную скорость потока (V_0) можно найти по зависимостям (2.4). Переносная скорость может быть определена из значений угловой скорости (ω) площадки осциллирующего устройства либо в частном случае – из значений частоты оборотов оси ствола:

$$V_{\Pi} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \nu, \quad (2.69)$$

где L – дальность подачи ОТВ, м; ν – частота оборотов осциллирующего устройства, об/с.

Так как векторы \bar{V}_0 и \bar{V}_{Π} находятся под углом 90 град относительно друг друга, то их сумма, а именно абсолютная скорость ($V_{абс}$) будет равна:

$$V_{абс} = \sqrt{\bar{V}_0^2 + \bar{V}_{\Pi}^2}. \quad (2.70)$$

Этим и объясняется увеличенная дальность подачи ОТВ, при работе ствола с осциллирующим устройством, так как показатель суммы векторов (абсолютной скорости) будет больше, чем показатель относительной скорости, который учитывается при расчете баллистики струи ОТВ (см раздел 2.2.2).

Для апробации теоретически выведенных данных был проведен эксперимент с разработанными экспериментальными универсальными исходными данными (см. раздел 2.1). При эксперименте исходные данные были следующие:

- расход экспериментального насадка – 5 л/с;
- дальность подачи (L) при стационарной подаче (без осциллирующего устройства и давлении перед стволом 0,4 МПа) – 32 м;
- скорость истечения ОТВ (V_0) – 30 м/с;
- угловая скорость осциллирующего устройства – 0,06 об/с (20 град/с).

Для вышеуказанных исходных данных, переносная скорость (2.69) будет равна:

$$V_{\Pi} = 2 \cdot 3,14 \cdot 32 \cdot 0,06 = 12,05 \text{ м/с}$$

Отсюда следует, абсолютная скорость ($V_{абс}$) будет равна:

$$V_{абс} = \sqrt{30^2 + 4,42^2} = 32 \text{ м/с}$$

При данной частоте оборотов, по выведенным зависимостям дальность подачи увеличилась на 2 м и составит 34 м, при небольшом расходе 5 л/с. При более высоких показателях расхода, где скорости потока ОТВ будут выше, чем экспериментальные показатели, дальность подачи ОТВ будет еще больше увеличиваться. Эксперимент проводился при угле осцилляции 40 град, карта орошения ОТВ показана на рисунке 2.40.

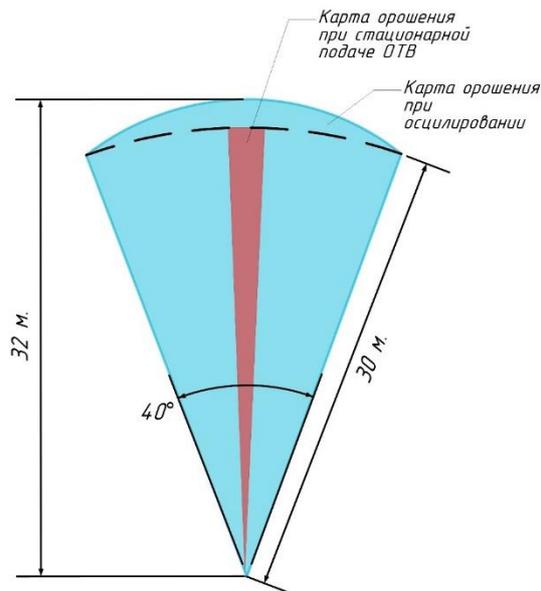


Рисунок 2.40 – Сравнительная карта орошения ОТВ пожарного ствола, имеющего расход 5 л/с при стационарной подаче и работе с осциллирующим устройством

Дальность подачи ОТВ будет зависеть от угловой скорости (ω) площадки осциллирующего устройства (рисунок 2.41).

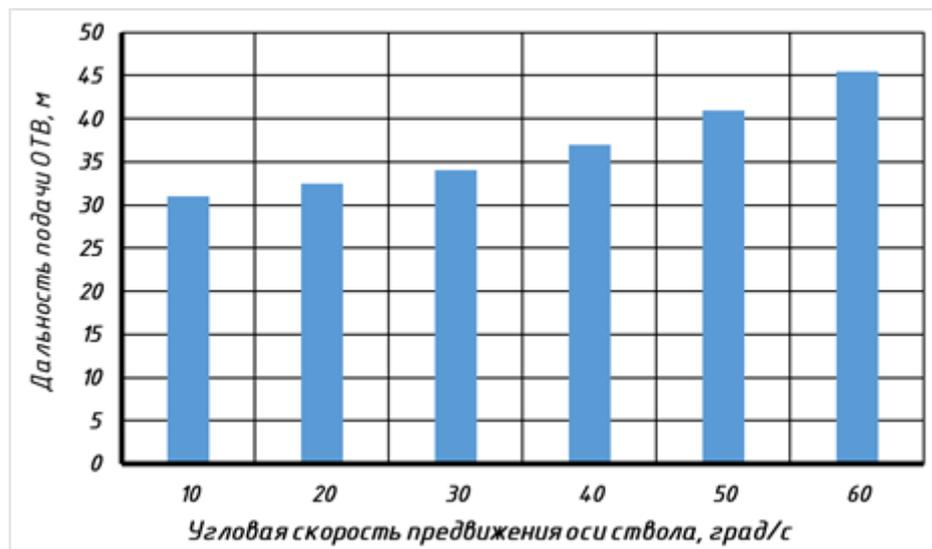


Рисунок 2.41 – Показатели дальности подачи ОТВ из ствола с универсальным насадком при разных угловых скоростях осцилляции

При определенном угле осцилляции, в данном случае угол был равен 40° , в крайних положениях углового сектора дальность подачи ОТВ из ствола равна дальности подачи при стационарной работе ствола (зафиксированного). Это обуславливается тем, что в крайних угловых положениях переносная скорость \bar{V}_n будет равна 0, так как рычажная система осциллирующего устройства останавливается для дальнейшего движения в обратную сторону.

Благодаря своим функциональным возможностям, технология осцилляции позволяет без присутствия человека увеличить площадь пожаротушения в несколько раз, следовательно, и эффективность подачи ОТВ при тушении или охлаждении. Но также стоит учитывать то, что интенсивность орошения при этом не меняется, т. е. все ОТВ, выпущенное из ствола, равномерно расходится по защищаемой площади.

2.4 Выводы по второй главе

Во второй главе диссертационной работы были рассмотрены физические аспекты процесса истечения ОТВ из универсальных насадков, формирующих разный факел распыла струи. Получена зависимость нахождения расхода ОТВ из кольцевого зазора универсальных насадков ствольной пожарной техники, а также определены коэффициенты расхода ОТВ и сопротивления при истечении жидкостей из универсальных насадков. Выведена формула по определению длины зоны разряжения за дефлектором универсального насадка, которая непосредственно влияет на качество формирования сплошных струй универсальных насадков. Впервые выведена физическая зависимость баллистики струи ствольной пожарной техники, как с универсальным насадком, так и с конусным.

Проведенные исследования показали, что ОТВ при выходе из универсального насадка обладает более высокими показателями интенсивности

орошения и равномерностью распределения осадков по площади, нежели при истечении из конусного насадка. Данные показатели очень важны при тушении машинных залов, так как равномерное распределение ОТВ обеспечивает отведение тепла от не горящих технологических установок и резервуаров при их охлаждении.

Выведенную физическую зависимость баллистики струи ОТВ можно использовать для ствольной пожарной техники, применяемой в роботизированных установках пожаротушения для попадания струи ОТВ в очаг.

Также в работе обоснована работа осциллирующих устройств ствольной пожарной техники, позволяющей обеспечивать непрерывную, повторяющуюся подачу ОТВ по заданной амплитуде колебаний оси пожарного ствола, что повысит качество и эффективность орошения ОТВ ферм перекрытия, при этом участие человека или ЭВМ (робота) не является обходимым, т. е. повышается безопасность для личного состава, что является очень важным моментом при тушении взрывоопасных объектов машинных залов электростанций.

Технологии применения ствольной пожарной техники с универсальными насадками говорят о необходимости внедрения полученных показателей в роботизированный комплекс, основанный на ствольной пожарной технике с универсальными насадками.

ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СТВОЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЗАЩИТЕ МАШИННЫХ ЗАЛОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Подробное исследование ствольной пожарной техники с различными насадками, а именно, обоснование гидравлических процессов в универсальном насадке и выведение практически значимых коэффициентов, баллистики струй орошения как стационарной ствольной пожарной техники, так и ствольной пожарной техники с осциллирующим устройством, пенообразование в воздушно-пенных насадках, говорит о том, что на основании выведенных данных требуется разработка новой технологии применения различной ствольной пожарной техники, применение которой в качестве стационарных автоматических установок пожаротушения обеспечит оперативное и качественное тушение пожаров машинных залов электростанций.

3.1 Предлагаемая технология применения ствольной техники с учетом результатов исследования

Анализ пожаров, произошедших в машинных залах, и опыт тушения данных объектов за рубежом показали, что на сегодняшний день самое выгодное и практически значимое при тушении таких пожаров – это оперативное тушение пожара и недопущение обрушения ферм перекрытия.

При возгорании резервуара с ЛВЖ или ГЖ от турбоагрегата требуется интенсивное охлаждение ферм, подверженных тепловому и огневому воздействию от пожара, а также тушение воздушно-механической пеной зеркала горения.

При оперативном тушении, до прибытия сил и средств пожарной охраны можно не останавливать турбоагрегат, что влечет за собой сокращение косвенного ущерба, что особенно важно на современном этапе развития всей

промышленности РФ, для которой в большинстве случаев и генерируется энергия.

Для обеспечения вышеизложенных положений с учетом требований нормативных документов в области расстановки ствольной пожарной техники для защиты машинных залов предложено учитывать следующие условия при расстановке ствольной пожарной техники в машинном зале электростанций:

1) в случае применения турбоагрегата, при аварии которого возможен розлив нефтепродукта, необходимо производить расстановку ствольной пожарной техники с водопенными насадками, формирующими воздушно-механическую, при этом количество стволов для тушения требуется рассчитывать с учетом интенсивность подачи ОТВ на защищаемую площадь разлива [72];

2) при расстановке ствольной пожарной техники для защиты ферм перекрытий требуется учитывать не только карты орошения, но и баллистические характеристики струи орошения в вертикальной плоскости, для доставки ОТВ в самые нагретые участки ферм (см. раздел 2.2.2);

3) при проектировании расстановки ствольной пожарной техники, с целью резервирования в случае отсутствия срабатывания одного из стволов, каждая точка пространства помещения должна орошаться не менее чем двумя струями;

4) при взрыве или возгорании масляных баков с ЛВЖ, требуется установка стационарных роботизированных пожарных лафетных стволов, на расстоянии, которое обеспечивает доставку ОТВ из лафетных стволов с нормативной интенсивностью для тушения и охлаждения. Данное требование обеспечит оперативную подачу ОТВ в очаг горения и на соседние технологические установки, что снизит интенсивность горения, уменьшит вероятность прогрева слоя в разгерметизированном баке до прибытия сил и средств пожарной охраны и снизит риск взрывного вскипания ЛВЖ;

5) при гидравлическом расчете противопожарного водоснабжения с учетом расставленных стационарных пожарных лафетных стволов на объекте защиты необходимо применять коэффициент сопротивления универсальных насадков лафетных стволов равный 0,6 (см. раздел 2.1);

6) при использовании ствольной пожарной техники с осциллирующим устройством необходимо учитывать, силу обратной реакции струи пожарного ствола для предотвращения равенства крутящего момента, создаваемого осциллирующим устройством и силой обратной реакции струи (см. раздел 2.3). Также увеличение дальности подачи ОТВ при осциллировании, но с учетом того, что в крайних положения оси ствола при осциллировании дальность подачи равна дальности при стационарной работе ствола (см. раздел 2.3);

7) с учетом научных исследований по влиянию кратности воздушно-механической пены на тушение нефтепродуктов устанавливать воздушно-пенные насадки, которые при своей работе образуют необходимую для тушения кратность воздушно-механической пены (см. раздел 2.2);

8) для безопасного тушения машинных залов и сохранения жизни и здоровья личного состава пожарной охраны предпочтительней применять роботизированные установки пожаротушения на базе ствольной пожарной техники с извещателями пламени и возможностью адаптироваться к изменению обстановки на пожаре (интенсивность теплового потока, температура и т. п.).

Выполнение вышеуказанных пунктов позволит сформировать совокупность методов, процессов и материалов, используемых в отрасли формирования требований к ствольной пожарной технике при тушении пожаров машзалов. Научное описание позволит улучшить способы технического производства и эксплуатацию ствольной пожарной техники с номинальным качеством и оптимальными затратами, с учетом текущего уровня техники для обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики.

3.2 Интеграция технологии применения ствольной техники в роботизированную установку пожаротушения машинных залов электростанций

Во втором десятилетии XXI в. мировые тенденции склонны к использованию роботов и роботизированных установок практически во всех сферах деятельности человека. Не обошли стороной данные тенденции и системы обеспечения пожарной безопасности, в том числе и при тушении машинных залов [107].

На сегодняшний день все более актуально становится применение стационарных роботизированных установок пожаротушения (далее – РУП) на базе лафетных пожарных стволов. Данные системы положительно зарекомендовали себя из-за того, что прибором подачи ОТВ является лафетный ствол. Данный прибор подачи на удаленном расстоянии струи подает ОТВ с расходами, превышающими расход обеспечивающий тушение или охлаждение технологического оборудования. Оборудование данных лафетных стволов электродвигателями и извещателями пламени позволяет автоматизировать движение и находить пламя во всех плоскостях объекта защиты.

При анализе существующих РУП было выявлено, что несколько компаний (ООО «ИЦПР «ЭФЭР», ООО «Коруфайер», ООО «Уралмеханика», ООО «НПП "ИНПРОКОМ"») производят РУП с функцией обнаружения пламени и подачи огнетушащего вещества в очаг пожара. У каждого производителя есть свои особенности в определении местоположения очага и подаче ОТВ, однако наиболее распространенным подходом является зональное определение очага в пространстве объекта защиты и подача ОТВ в эту зону. Такой подход может привести к излишним проливам в зоне, где находится очаг, и в некоторых случаях может только ухудшить ситуацию на пожаре. В результате возрастает вероятность причинения излишнего прямого и косвенного ущерба после тушения для самого защищаемого объекта. Производители выбирают такой подход из-за

ограничений современных извещателей пламени, которые не могут точно определить расстояние до очага пожара, а только сигнализируют о наличии инфракрасного излучения пламени.

На сегодняшний день нормативные документы предъявляют требования по расстановке минимум двух стволов на объекте защиты. В процессе исследований в главе 2 настоящей диссертационной работы также подтверждены данные требования. Данные требования будут отправными для создания алгоритма поиска и тушения очагов пожара роботизированными установками пожаротушения на базе ствольной пожарной техники.

Учитывая, что разрабатываемая в данной главе система пожаротушения уже будет обладать автономностью, т. е. режим работы, без поддержки каких-то внешних факторов (управление ствольщиком, или заданным алгоритмом подачи ОТВ), а также адаптивностью – способностью системы подстраиваться под изменяющуюся обстановку на пожаре. Данная система по праву может называться автономно-адаптивной системой пожаротушения (рисунок 3.1).

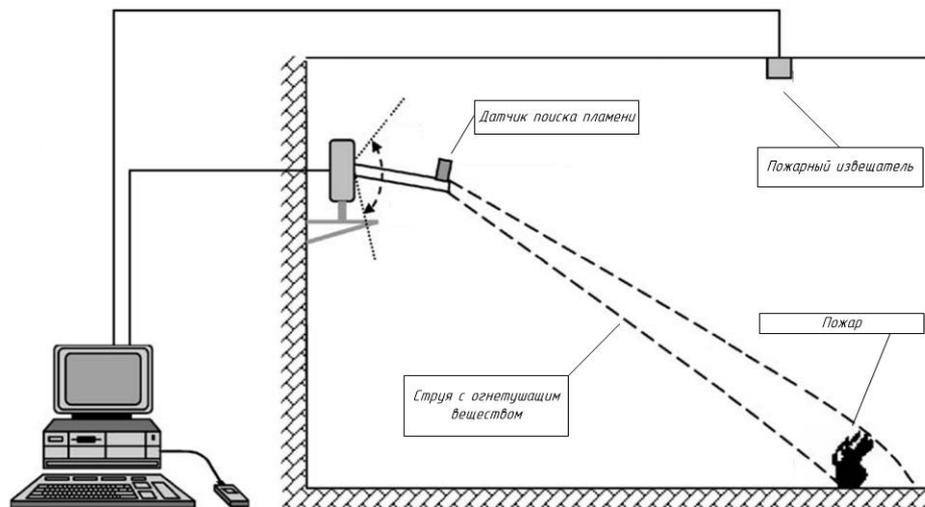


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема работы автономно-адаптивной системы

Разработанная система управления работает по следующему принципу: на блок управления (компьютер) приходит сигнал пожара, данный сигнал может прийти разными путями (от ввода исходных данных оператором или от пожарной сигнализации), блок управления дает команду лафетным стволам с установленными на них извещателями пламени, осуществлять поиск в

пространстве объекта, после нахождения горения одним стволом, он останавливается, второй ствол должен подтвердить факт нахождения в данной точке пространства горение, после чего до места нахождения очага два ближайших ствола корректируют свое положение в пространстве для подачи ОТВ по нужной траектории и подают сигнал на блок управления для открытия задвижек и пуска ОТВ на стволы, которые будут осуществлять тушение.

Концепция работы не вызывает нареканий, но на сегодняшний день извещатели пламени, которые устанавливаются на стволы отечественного или зарубежного производства, и которые используются в РУП не могут дать сигнал на каком расстоянии от извещателя находится пламя. Современные извещатели пламени, работающие в инфракрасном (ИК) и видимом диапазоне, определяют только то, что перед ними есть горения, имеющее ИК-излучение (электромагнитное излучение с длиной волны больше, чем видимый спектр, но короче, чем микроволновое) (рисунки 3.2, 3.3).

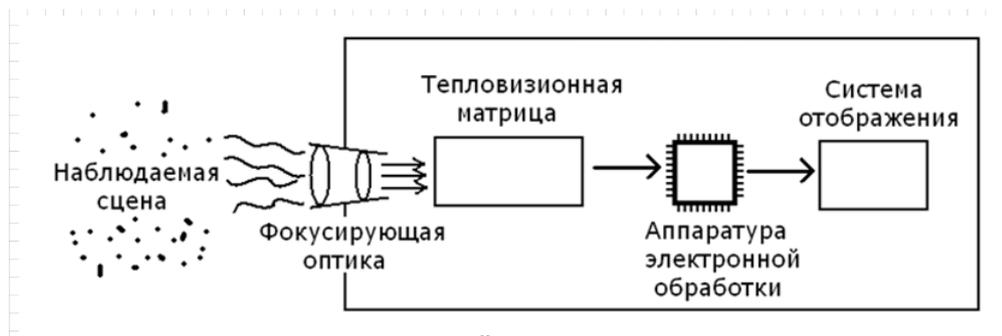


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема работы извещателя пламени



Рисунок 3.3 – Извещатель пламени ИПП-329/330-10-1

Для более точного исследования возможности реализации автономно-адаптивной системы на базе ствольной пожарной техники были разработаны образцы роботизированных пожарных лафетных стволов с установленными на них извещателями пламени (рисунок 3.4). Один ствол был разработан с универсальным насадком (рисунок 3.4, б), другой с конусными установленным на него дефлектором для образования плоской струи (рисунок 3.4, а).



а



б

Рисунок 3.4 – Разработанные роботизированные пожарные лафетные стволы с извещателями пламени:

а – роботизированный ствол с конусным насадком; *б* – роботизированный ствол с универсальным насадком

Разные насадки были разработаны для дальнейших гидравлических испытаний и апробации выведенных показателей по расчету баллистики струи ОТВ.

Первоначально были проведены испытания по нахождению пламени извещателем, установленном на стволе в «сухом режиме», т. е. без подачи ОТВ. Испытания основывались на методиках ГОСТ Р 50898–96 «Извещатели пожарные. Огневые испытания» [108].

Специально для испытаний был разработан модульный очаг в виде поддона из листовой стали толщиной 2 мм размером 330×330×50 мм (рисунок 3.5) [108].



Рисунок 3.5 –Поддон для проведения огневых испытаний

При испытаниях в качестве горючего вещества использовались 650 г смеси гептана (97 % объема) и толуола (3 % объема) [108], поджог смеси осуществляют открытым пламенем (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Горение горючей смеси гептана и толуола

При испытаниях роботизированный ствол запускали по разным траекториям для поиска пламени, при этом сам ствол был размещен на передвижной станине так, что направляющая ось насадка ствола была на высоте 1 м от поверхности при горизонтальном расположении. В процессе испытаний ствол отодвигался от пламени на расстояние от 20 до 70 м. Результаты испытаний показали, что на расстоянии 70 м ствол находит пламя, но не сразу, так как пламя при горении пульсирует и извещатель не может уловить ИК-излучение. Четкий

сигнал о нахождении пламени на извещатель приходил при расположении ствола от очага горения на расстоянии 50 м (рисунок 3.7).

Данные показатели коррелируются с техническими показателями современных извещателей пламени различных производителей. Также данные показатели отлично подходят для дальнейшего внедрения роботизированных стволов с извещателями пламени в автономно-адаптивную систему пожаротушения, так как показатель 50 м соответствует дальности подачи ОТВ из лафетного ствола с расходом 20 л/с, и кроме этого данное расстояние между стволами вполне приемлемо для их расположения на объекте защиты с учетом требования по пересечению двух струй в пространстве объекта защиты.



Рисунок 3.7 – Испытания роботизированного пожарного лафетного ствола с извещателем пламени

Проведенные испытания показали, что номинальная и практически значимая дальность действия извещателя пламени равна 50 м. Но стоит отметить, что извещатель не выдает сигнал, о том, на каком расстоянии он видит ИК-излучение пламени, а только то, что он видит пламя. Исходя из этого в данной работе для более точного местонахождения очага пожара роботизированными лафетными стволами с ИК-извещателями поиска пламени предлагается использовать метод триангуляции. Суть метода заключается в создании сети опорных точек и построении на основании этих точек треугольников, у которых находятся все углы и длины некоторых базовых сторон.

Исходные данные для работы метода следующие: два роботизированных лафетных ствола с ИК-извещателями пламени, установлены на станине с известной высотой расположения оси ствола и расстоянием между станинами стволов. При сканировании защищаемой зоны ось ствола с установленным на него извещателем пламени передвигается по заранее программируемой траектории (исходя из специфики объекта защиты) и останавливается в тот момент, когда чувствительный луч извещателя пересекается с пламенем, при этом образовывая углы между осью ствола, станиной на которой он установлен, и между осью и проекцией соединяющей две станины (рисунок 3.8).

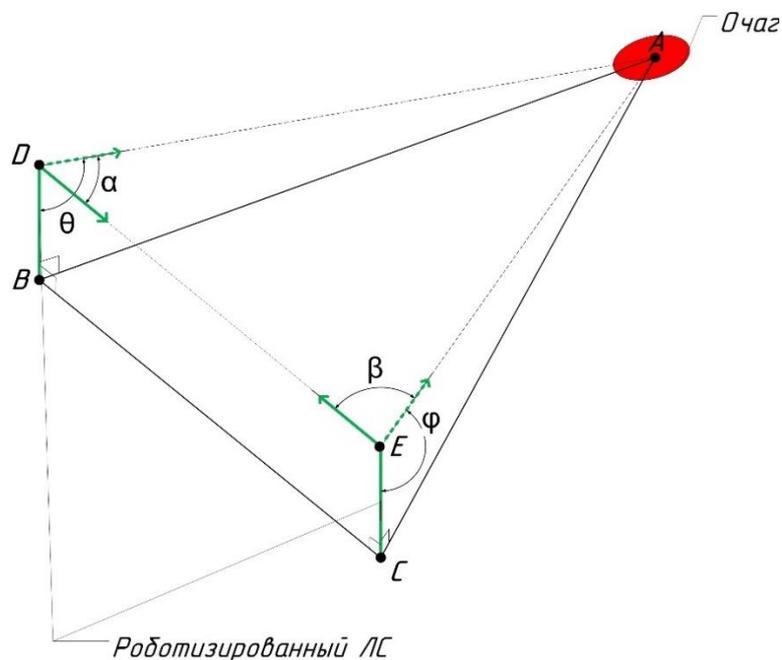


Рисунок 3.8 – Схема триангуляции при расстановке двух роботизированных лафетных стволов и очага

После начала поиска пламени двумя роботизированными лафетными стволами, при обнаружении извещателями пламени очага, лафетные стволы позиционируются, образуя углы α , β , θ и φ (см. рисунок 3.8) между осью станины и осью лафетного ствола, также известны расстояния между осями станин лафетного ствола ($DE = BC$), и расстояния BD и CE (исходные данные). Исходя из этого по теореме синусов, взаимоотношение сторон и углов в сформированном треугольнике ADE будет следующим:

$$\frac{AE}{\sin\alpha} = \frac{AD}{\sin\beta} = \frac{DE}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta))}. \quad (3.1)$$

Исходя из теоремы синусов можно найти стороны AE и AD . Далее, используя тригонометрические функции и теорему Пифагора, можно найти остальные стороны и углы, в том числе и искомые стороны AB и AC :

$$\sin \angle DAB = \frac{BD}{AD}. \quad (3.2)$$

$$\sin \angle EAC = \frac{CE}{AE}. \quad (3.3)$$

При этом искомые расстояния будут равны:

$$AB = \sqrt{AD^2 - BD^2}. \quad (3.4)$$

$$AC = \sqrt{AE^2 - CE^2}. \quad (3.5)$$

Данный метод был заложен в алгоритм работы автономно-адаптивной системы и проведены испытания уже с крупным очагом 233 В, который имеет круглую форму диаметром 3000 мм и высоту борта 200 мм (рисунки 3.9, 3.10).

Для компьютерной программы данный алгоритм не сложен и просчитывается за считанные доли секунды. Далее, зная эти расстояния и выведенные заранее зависимости по траектории движения ОТВ в пространстве (2.42), возможно позиционировать лафетный ствол для точной подачи ОТВ в очаг.

Для проведения испытаний была проведена расстановка роботизированных лафетных стволов с универсальным насадком и извещателями пламени по схеме, изображенной на рисунке 3.9, а также подготовлено горючее вещество в очаге в составе 466 л воды и 233 л бензина АИ-92.

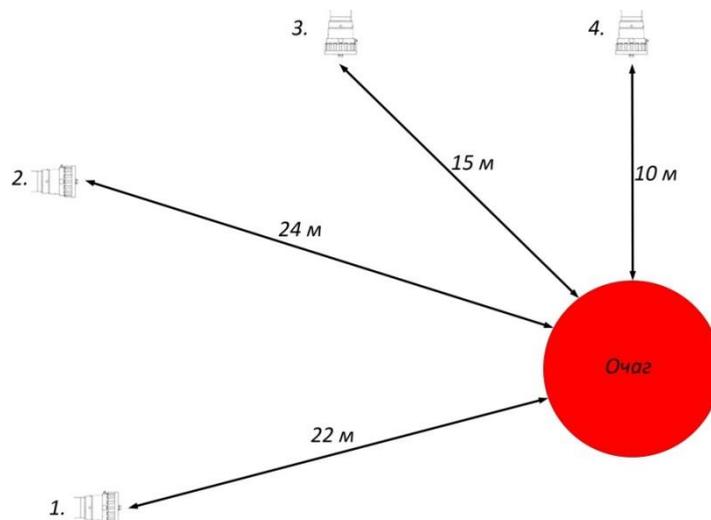


Рисунок 3.9 – Схема расстановки роботизированных лафетных стволов и очага

В качестве ОТВ в автономно-адаптивной системе пожаротушения был применен раствор пенообразователя и воды для создания изоляционной пленки на зеркале горения.

Испытания проводили в следующем порядке:

- роботизированные лафетные стволы находились в исходных стационарных положениях;
- поджог очага и его горение в течении 1 мин;
- включение сигнала о пожаре.

С учетом проведенных испытаний, концептуально закладываемые характеристики автономно-адаптивной системы полностью сработали. На основе этого был написан алгоритм работы автономно-адаптивной системы [109] (рисунок 3.12) (Приложение А).

После получения сигнала о пожаре, автономно-адаптивная система включила 4 роботизированных ствола, которые начали сканировать защищаемую территорию. Первыми очаг нашли стволы 4 и 3 (см. рисунок 3.9), так как ближе всего находились к очагу, после этого от стволов 3 и 4 был передан сигнал на блок управления и стволы 1,2 подтвердили место нахождения очага. Для усложнения тушения подача ОТВ осуществлялась только на дальние стволы 1 и 2 (см. рисунок 3.9). После нахождения очага пожара стволы позиционировались для подачи ОТВ и передали сигнал на задвижку для открытия. Струи ОТВ попали в очаг пожара и потушили его. Была проведена серия экспериментов – 10 поджогов, и каждый раз система срабатывала в запланированном режиме работы. Время нахождения очага и тушения пожара составляла в диапазоне 2:20–2:30 мин (рисунки 3.10, 3.11) (Приложение Б).



Рисунок 3.10 – Работа автономно-адаптивной системы

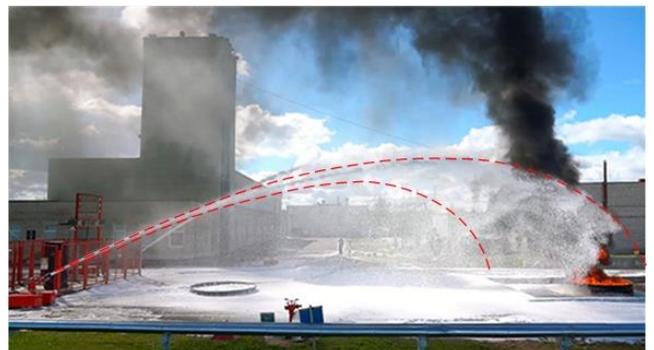


Рисунок 3.11 – Баллистика струи при работе автономно-адаптивной системы [109]

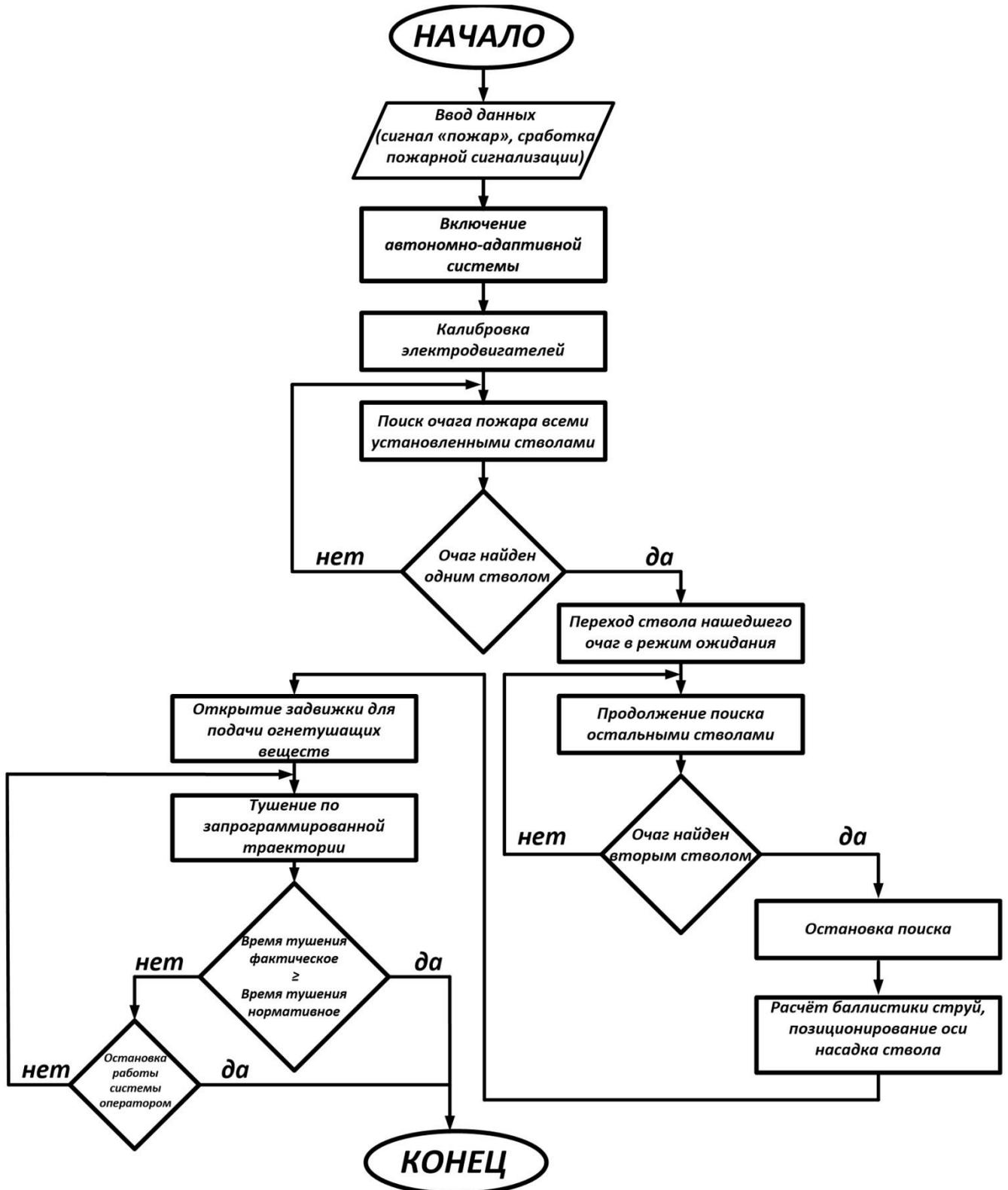


Рисунок 3.12 – Алгоритм работы автономно-адаптивной системы

3.3 Выводы по третьей главе

Подведены итоги исследований по обоснованию физических процессов при истечении ОТВ из различных насадков, а также по обоснованию баллистики струй ОТВ при применении различных видов ствольной пожарной техники.

На основании выведенных зависимостей и коэффициентов для современных видов ствольной пожарной техники с различными насадками в третьей главе обоснованы актуальные на сегодняшний день требования по проектированию и применению средств пожаротушения на базе пожарных лафетных стволов (Приложение Б), т. е. сформирована технология применения ствольной пожарной техники.

По имеющимся данным разработана и испытана автономно-адаптивная система пожаротушения, которая базируется на пожарных роботизированных лафетных стволах. Разработанная система успешно прошла огневые испытания на Калининской атомной электростанции по нахождению очага горения и его тушению полностью в автономном режиме без участия оператора. Для работы автономно-адаптивной системы написан алгоритм работы.

Разработанная автономно-адаптивная система показала свою работоспособность и практическую значимость, подкрепленную научными изысканиями. Данная система при внедрении на Калининскую АЭС обеспечит мгновенное реагирование на любое возгорание и до прибытия сил и средств пожарной охраны не только понизит интенсивность горения ЛВЖ и ГЖ, но и может полностью потушить пожар. Данные показатели существенно снизят прямые и косвенные ущербы от пожаров на объектах энергетики, где есть машинный зал с турбоагрегатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ статистических данных и характерных примеров пожаров на объектах энергетики свидетельствует о том, что в большинстве случаев первоочередное применение систем противопожарной защиты приходится на ствольную пожарную технику. При этом технология применения ствольной пожарной техники на сегодняшний день основывается на гидравлических значениях и показателях для ствольной пожарной техники с конусными насадками, тогда как ствольная пожарная техника с универсальными насадками, имеет существенные преимущественные отличия по физическим показателям подачи огнетушащих веществ при тушении пожаров.

2. В диссертационной работе проведены исследования универсальных насадков ствольной пожарной техники и получены их гидродинамические показатели для дальнейшего внесения корректировок в расчеты противопожарного водоснабжения, где применяется ствольная пожарная техника с универсальными насадками. На основе полученных показателей разработана новая технология применения ствольной пожарной техники для защиты машинных залов электростанций.

3. Разработана модель движения огнетушащих веществ в атмосфере после выхода из универсального насадка ствольной пожарной техники, получены физические зависимости для осциллирующих устройств ствольной пожарной техники, а также зависимости по определению силы обратной реакции струи в универсальных насадках ствольной пожарной техники.

4. На основе научных изысканий разработан новый метод нахождения очага пожара роботизированной установкой пожаротушения машинных залов, состоящей из пожарных лафетных стволов с универсальными насадками, и разработана автономно-адаптивная система управления роботизированной установкой пожаротушения, состоящей из ствольной пожарной техники с универсальными насадками.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБП – агрегат бесперебойного питания

АЭС – атомная электростанция

ГЭС – гидроэлектростанция

ГРЭС – государственная районная электростанция

ЕЭС России – АО «Системный оператор единой энергетической системы России»

КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика

КПП – контрольно-пропускной пункт

МЗ – машинный зал

ОТВ – огнетушащее вещество

ПР – пожарный робот

ПТН – питательный турбонасос

РУП – роботизированная установка пожаротушения

РУСН – распределительное устройство собственных нужд

СПСЧ – специальная пожарно-спасательная часть

СТО – стандарт организации

ТА – турбоагрегат

ТЭС – теплоэлектростанция

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

ФПС – федеральная противопожарная служба

ЦВД – цилиндр высокого давления

ЦСД – цилиндр среднего давления

ЩПТ – щит постоянного тока

ЭФЭР – ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР»

VOF – Volume of the liquid model – прямой метод прогнозирования формы границы раздела между несмешивающимися фазами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешков, М.В. Создание пожарной и аварийно-спасательной техники для работы в экстремальных метеорологических условиях / М.В. Алешков, О.В. Двоенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2011. – № 4. – С. 4–10.
2. Алешков, М.В. Пожарная техника для ликвидации пожаров и аварий на объектах энергетики / М.В. Алешков, О.В. Двоенко, И.А. Ольховский // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 2 (76). – С. 69–72.
3. Алешков, М.В. Полигонные испытания роботизированной установки пожаротушения для объектов энергетики / М.В. Алешков, М.Д. Безбородько, И.А. Гусев, О.В. Двоенко, И.А. Ольховский // Технологии техносферной безопасности. – 2018. – № 3(79). – С. 9–18.
4. Ищенко, А.Д. К проблеме достаточности сил и средств тушения пожаров объектов энергетики / А.Д. Ищенко, М.В. Алешков, В.В. Роечко, А.Л. Холостов, А.И. Соковнин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 3. – С. 65–71.
5. Ищенко, А.Д. Оценка достаточности сил и средств для тушения пожаров объектов энергетики / А.Д. Ищенко, М.В. Алешков, В.В. Роечко, А.А. Колбасин, А.И. Соковнин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 4. – С. 6–12.
6. Колбасин, А.А. Экспериментальное исследование величины тока утечки по струе огнетушащего вещества из ручных пожарных стволов / А.А. Колбасин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2012. – № 2. – С. 10–16.
7. Колбасин, А.А. Особенности развития и тушения пожаров на объектах электроэнергетики / А.А. Колбасин, М.В. Алешков, Д.С. Пушкин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 4. – С. 6–12.
8. Федяев, В.Д. Гидродинамика компрессионной пены при тушении пожаров на объектах энергетики / В.Д. Федяев // Пожары и чрезвычайные

ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 3. – С. 44–48.

9. Чистяков, Т.И. Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования газокompрессорных станций / Т.И. Чистяков, В.В. Роечко, Д.В. Тараканов, Р.В. Халиков // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30. – № 1. – С. 64–74.

10. Гусев, И.А. Применение робототехнических комплексов для тушения пожаров на объектах энергетики / И.А. Гусев, М.В. Алешков, А.В. Рожков, О.В. Двоенко, И.А. Ольховский // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 1. – С. 48–53.

11. Гусев, И.А. Применение установок пожаротушения с системами гидроабразивной резки на объектах атомной энергетики / И.А. Гусев, М.В. Алешков, М.Д. Безбородько // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 4. – С. 7–12.

12. Цариченко, С.Г. Направления развития экстремальной робототехники МЧС России с учетом опыта практического применения / С.Г. Цариченко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 4–6.

13. Цариченко, С.Г. Противопожарная защита машинных залов атомных электростанций с использованием многофункциональных робототехнических комплексов / С.Г. Цариченко, С.Г. Немчинов, В.А. Харевский, Ю.И. Горбань // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 2. – С. 20–26.

14. Цариченко, С.Г. Автоматические и роботизированные системы пожаротушения как альтернатива оперативным подразделениям на автономных и малообслуживаемых объектах топливно-энергетического комплекса / С.Г. Цариченко, С.Г. Немчинов // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 2. – С. 63–70.

15. Горбань, Ю.И. Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране [Текст] / Ю.И. Горбань. – М.: Пожнаука, 2013. – 352 с.

16. Горбань, Ю.И. Применение автоматических установок пожаротушения на базе роботизированных пожарных комплексов с полнопроцессной системой управления для защиты спортивных и зрелищных сооружений / Е.А. Синельникова, Ю.И. Горбань // Пожарная безопасность. – 2010. – № 1. – С. 185–187.

17. Горбань, Ю.И. Пожарные роботы в современных технологиях автоматического пожаротушения / Е.А. Синельникова, Ю.И. Горбань // Алгоритм безопасности. – 2010. – № 3. – С. 66–71.

18. Горбань, Ю.И. Современная ствольная пожарная техника для противопожарной службы МЧС России / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Пожарная безопасность. – 2010. – № 4. – С. 168–169.

19. Горбань, Ю.И. Современные инновационные технологии пожаротушения на базе лафетных стволов с осцилляторами / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Пожарная безопасность. – 2011. – № 2. – С. 160–162.

20. Горбань, Ю.И. Современное вооружение пожарных машин / Е.А. Синельникова, Ю.И. Горбань // Пожарное дело. – 2011. – № 3. – С. 25–27.

21. Горбань, Ю.И. Современные технологии пожаротушения на базе пожарных роботов / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // XXI Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвященная 75-летию создания ВНИИПО: сб. тезисов докладов. Часть 2. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 148.

22. Горбань, Ю.И. Автоматические установки пожаротушения на базе роботизированных пожарных комплексов АУП-РПК для защиты машинных залов АЭС, ТЭЦ и ГЭС / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 136–142.

23. Горбань, Ю.И. Защита пожаровзрывоопасных объектов нефтяной и газовой промышленности лафетными стволами и пожарными роботами / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Transport security & Technologies. – 2013. – № 3 (34). – С. 60–61.

24. Горбань, Ю.И. Установки автоматического пожаротушения на базе лафетных стволов с осцилляторами для защиты объектов энергетики / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 1. – С. 76–78.

25. Горбань, Ю.И. Пожарные роботы и ствольная пожарная техника в пожарной автоматике и пожарной охране: I. Устройства формирования струй / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 4. – С. 62–64.

26. Горбань, Ю.И. Автоматические установки пожаротушения на базе роботизированных пожарных комплексов для защиты аэропортов / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 2. – С. 190–192.

27. Горбань, Ю.И. Мобильный комплекс «Гюрза» для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ на объектах с конструкциями из высокопрочных материалов / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова, С.Г. Цариченко // Пожарная безопасность. – 2014. – № 4. – С. 88–90.

28. Горбань, Ю.И. Пожарные роботы - новый глобальный продукт в системе пожарной безопасности // Ю.И. Горбань, М.Ю. Горбань, Е.А. Синельникова // XXVIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности»: сб. матер. в 2 ч. – М., 2016. – С. 26–39.

29. Горбань, Ю.И. Роботизированные установки пожаротушения на базе стационарных и мобильных пожарных роботов // Ю.И. Горбань, М.Ю. Горбань, В.С. Кучатова, Е.А. Синельникова, Е.В. Павлов // XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: сб. матер. Балашиха, 2017. – Т. 2. – С. 506–510.

30. Горбань, Ю.И. Современные технологии пожаротушения на базе пожарных роботов / Ю.И. Горбань, С.Г. Цариченко, Е.А. Синельникова // Пожарная безопасность – 2015. Специализированный каталог. – 2015. – Т. 2015. – С. 42.

31. Горбань, Ю.И. Тактика применения роботизированных установок пожаротушения в пожарной автоматике и пожарной охране / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности»: сб. матер. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС РФ, 2014. – С. 382–383.
32. Gorban, Yu.I. Fire robots. Industrial / Yu.I. Gorban // Fire Journal. – 2016. – Vol. 103. – P. 12.
33. Горбань, Ю.И. Системы пожаротушения для защиты машинных залов ТЭЦ, АЭС, и ГЭС / Ю.И. Горбань, Е.А. Синельникова // Проблемы и решения. Алгоритм безопасности. – 2011. – № 3. – С. 32–36.
34. Варганов, В.А. Стационарный роботизированный комплекс противопожарной защиты крупных концертных залов, торговых комплексов, авиационных ангаров, машинных залов электростанций и других крупных объектов / Е.А. Синельникова, А.А. Кротова, В.А. Варганов // Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности»: сб. матер. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС РФ, 2013. – С. 291–293.
35. Тарасов-Агалаков, Н.А. Практическая гидравлика в пожарном деле [Текст] / Н.А. Тарасов-Агалаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Москва коммун. хозяйства РСФСР, 1959. – 262 с.
36. Абросимов, Ю.Г. Гидравлическое сопротивление напорных пожарных рукавов [Текст] / Ю.Г. Абросимов, З.Б. Хоанг // 21 Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности»: сб. матер. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. – С. 106–108.
37. Карпенчук, И.В. Математическая модель движения жидкости в канале пожарного ствола с дефлектором [Текст] / И.В. Карпенчук, В.В. Пармон, Д.А. Шафранский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. – № 2(30). – С. 133–145.
38. Карпенчук, И.В. Расчет формы криволинейной поверхности дефлектора пожарного ствола / И.В. Карпенчук, Д.А. Шафранский // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием.

«Пожарная безопасность: проблемы и перспективы»: сб. матер. – М., 2012.– С. 190–193.

39. Научные исследования ствольной техники компанией TFT [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.tft.com/Education?topic=N2knOw> (дата обращения 06.05.2020).

40. Единая энергетическая система России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2021/> (13.06.2023).

41. Грудина, С.А. Разработка метода снижения аварийности и травматизма на опасных производственных объектах [Текст] / С.А. Грудина, Е.В. Глебова // 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России»: сб. матер. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. – С. 450–451.

42. Лукьянченко, А.А. Обеспечение контроля взрывопожароопасности и экологической напряженности воздушной среды в помещениях высотных объектов [Текст] / А.А. Лукьянченко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 2. – С. 37–40.

43. Грудина, С.А. Расчет вероятности аварии с учетом показателей надежности человека-оператора [Текст] / С.А. Грудина, Е.В. Глебова // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 3. – С. 2–5.

44. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс]: федер.закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ: (в ред. от 29 декабря 2022 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

45. Об утверждении Перечня типовых видов опасных производственных объектов для целей регистрации в государственном реестре [Электронный ресурс] приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 апреля 2006 г. № 389. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

46. Кудрявый, В.В. Энергетика работает с перенапряжением [Электронный ресурс] / В.В. Кудрявый // Новая газета. – 2009. – № 96. – Режим

доступа: <http://www.novayagazeta.ru/politics/43738.html> (дата обращения 15.04.2018).

47. Томаков, В.И. Защита пространственных металлических конструкций машинных залов энергетических объектов от воздействия высоких температур в условиях пожара / В.И. Томаков, М.В. Томаков, Е.Г. Пахомова, В.В. Андриенко, М.Е. Пашкова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т.8. – № 1(26). – С. 67–80.

48. Шишкин, А.Н. ТЭК России. Курс на безопасность? [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации [сайт]. — Режим доступа: https://docviewer.yandex.ru/view/0/ТЭК_России:_Курс_на_безопасность?/234_XEJ.pdf (дата обращения 16.07.2020).

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

50. Российский статистический ежегодник. 2011–2021 [Текст] / Стат. сб. // Росстат. – М., 2020. – 694 с.

51. Жаров, А.П. Противопожарная система для турбогенераторов ТЭС [Текст] / А.П. Жаров, Н.З. Беликова, В.Д. Келлер, Ю.В. Ржезников, В.А. Комаров // Электрические станции. – 2001 – № 6. – С.43–46.

52. Солдатов, Г.Е. О путях снижения рисков пожаров в машинных залах АЭС / Г.Е. Солдатов, О.С. Голодова // Атомкон. – 2009. – № 2(3). – С. 42–46.

53. A 30-year Study of Large Losses in the Gas and Electric Utility Industry / ed. by L.R. Hathaway. – 5th edition. – M&M Protection Consultants, 1995. – Pp. 152–158.

54. Nuclear Power Plant Turbine Hall Fires / L.R. Hathaway (M&M PC) // Fire & Safety '94 Conference. – Barcelona, NEI, 1994. – Pp. 45–46.

55. Микеев, А.К. Противопожарная защита АЭС / А.К. Микеев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.

56. Микеев, А.К. Пожары на радиационно-опасных объектах / А.К. Микеев. – М., 2000. – С. 26–100.

57. Отчет. Статистика пожаров Всемирной организации ассоциации, эксплуатирующих атомные станции (всемирной организации эксплуатирующих атомные станции) с 2012 по 2015 годы. Анализ недостатков противопожарной защиты АЭС. Отчет RTR – Австрия, 2019. – С. 36.

58. Солдатов, Г.Е. Технический отчет Разработка технических предложений по системам и устройствам локализации возможных пожаров на турбогенераторах с водородным охлаждением (применительно к энергоблоку ВВЭР-1000) / Г.Е. Солдатов, О.С. Голодова, С.И. Кочнев, Е.В. Бородкина. – М., 2008. – С. 9–36.

59. Сурнина, А.Е. Современные чрезвычайные происшествия на АЭС в мире и их последствия для окружающей среды / А.Е. Сурнина, Л.В. Рогожина // Всероссийская научно-практическая конференция «Неделя студенческой науки»: сб. матер. – М., 2023. – С. 599–601.

60. Фогилев, И.С. Моделирование действий оперативного персонала атомной электрической станции в условиях развития опасных факторов пожара / И.С. Фогилев, А.Д. Ищенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 1. – С. 20–27.

61. Самородов, Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов / Ю.Н. Самородов // Энергия единой сети. – 2014. – № 2(13). – С. 70–80.

62. Бурдин, А.М. Технический отчет о проведении натуральных огневых испытаний установок пожаротушения с использованием компрессионной технологии пенообразования, применительно к объектам АЭС с учетом особенностей и специфики тушения пожаров на данных объектах / А.М. Бурдин. – Миасс, 2015. – С. 180.

63. Жаров, А.П. Противопожарная система для турбоагрегатов энергоблоков ТЭС / А.П. Жаров, Н.З. Беликова, В.Д. Келлер, Ю.В. Ржезников, В.А. Комаров // Электрические станции: ежемесячный производственно-технический журнал / Министерство промышленности и энергетики РФ [и др.]. – 2001 – № 6. – С. 43–46.

64. Пузач, С.В. К определению формы конвективной колонки над очагом пожара в помещении [Электронный ресурс] / С.В. Пузач, С.А. Колодяжный, Н.В. Колосова // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 6 (64). – С. 77–84. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-6/20-06-15.ttb.pdf> (дата обращения 30.12.2022)

65. Чеповский, В.О. Некоторые аспекты огнезащиты металлоконструкций машзалов АЭС / В.О. Чеповский, Л.Н. Вахитова // Техника и технологии. – 2010. – № 1 (43). – С. 65.

66. Прытков, Л.Н. Моделирование пожара в типовом машинном зале атомной электростанции для оценки эффективности внедрения роботизированных установок пожаротушения / Л.Н. Прытков, Н.М. Барбин, А.М. Кобелев, С.А. Титов, Е.В. Гришина // Техносферная безопасность. – 2021. – С. 78–88.

67. Меженов, В.А. К вопросу достоверности применяемых исходных данных для расчета сил и средств в документах предварительного планирования / В.А. Меженов, И.А. Ольховский, А.Н. Неровных, С.С. Скворцов // III Международная научно-практическая конференция «Гражданская оборона на страже мира и безопасности»: сб. матер. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 155–161.

68. Письмо ГК Росатом от 23 июня 2016 г. №1-1.4/24305 «О проведенных противопожарных тренировках». – АО «Концерн Росэнергоатом» от 07.07.2016 №9/04/3040-ВН.

69. ГОСТ 12.1.033–81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения (с изм. 1) [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (утв. и введ. в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 августа 1981 г. №4084). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

70. ГОСТ Р 51043–2002. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования [Электронный ресурс] национальный стандарт (принят и введ. в действие Госстандартом России

от 25 июля 2002 г., № 287-ст). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

71. ГОСТ Р 51115–97. Техника пожарная. Стволы пожарные лафетные. Общие технические требования. Методы испытаний [Электронный ресурс] национальный стандарт (принят и введ. в действие Госстандартом России от 25 декабря 1997 г., № 425). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

72. СП 485.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 31.08.2020 г. № 628). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

73. Меженов, В.А. Разработка методики оценки площади орошения и интенсивности подачи огнетушащих веществ пожарными лафетными стволами [Текст] / В.А. Меженов, И.А. Ольховский // 28 Международная научно-практическая конференция «Системы безопасности – 2019»: сб. матер. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 206–211.

74. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика: учеб. руководство для вузов. Том 1 [Текст] / Г.Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1999. – 600 с.

75. Ольховский, И.А. Определение гидравлических характеристик пожарных лафетных стволов [Текст] / И.А. Ольховский, С.С. Скворцов, П.В. Саботницкий // Конференция «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности»: сб. матер. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 410 с.

76. TASK FORCE TIPS. High – performance. Fire fighting equipment: katalog/ – TASK FORCE TIPS. – USA, 2013. – 75 p.

77. Применение вычислительной гидрогазодинамики при конструировании пожарных стволов / И.А. Ольховский, В.А. Меженов, М.М. Данилов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 3. – С. 69–76.

78. Меженов, В.А. Истечение огнетушащих веществ и образование струй из ствольной техники с универсальным насадком // IX Международная научно-практическая конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2020»: сб. матер. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 12.

79. Техническое описание «Стволы пожарные лафетные переносные BLITZFIRE-RU с ручным управлением и BLITZFIRE OSC-RU осциллирующий в комплекте с насадками типа MAX-Series». – М., 2012. – 23 с.

80. Каталог ТПП «Пеленг». – Нижний Новгород, 2015. – 75 с.

81. Пеленг. Каталог продукции 2016 год. – Нижний Новгород, 2016. – 55 с.

82. Monitore Alco: katalog. – Frankfurt am Main, 2013. – 64 p.

83. Техническое описание «Стволы пожарные лафетные переносные CROSSFIRE с основанием SAFETAK и стационарные KNIGHTFIRE и PROTECTOR в комплекте с насадками типа: MASTER, MONSOON, TYPHOON, INDUSTRIAL NOZZEL, эжектирующим насадком MASTER FOAM, пенным насадком FJ-LX-M». – М., 2011. – 86 с.

84. Техническое описание «Стволы пожарные лафетные стационарные MONSOON-RU с ручным управлением и MONSOON-RU RC с дистанционным управлением в комплекте с насадками типа MASTER STREAM». – М., 2011. – 35 с.

85. Техническое описание № 006-2013 «Стволы пожарные лафетные типов: GP 3000, GP 5000, GP 7000; переносные и стационарные, в комплекте с водяным насадком, пенным насадком, пенным самовсасывающим насадком и водо-пенным насадком распылителем типа TURBOPONS». – М., 2013. – 42 с.

86. Техническое описание № 016-2015 «Водо-пенные насадки TURBOMATIC 3000 и TURBOMOUSSE 3000 для лафетных стволов GP 3000». – М., 2015. – 8 с.

87. Техническое описание № 022 – 2016 «Ствол пожарный лафетный переносной COMPACTOR с водо-пенными насадками TURBOPONS и TURBOMATIC». – М., 2016. – 10 с.

88. Техническое описание № 009-2013 «Стволы пожарные лафетные типов: НН, НР, ЕЛ, НУ; переносные и стационарные, в комплекте с водяным насадком, пенным насадком, пенным насадком с эжектирующим устройством и водо-пенным насадком распылителем». – М., 2013. – 48 с.

89. NFPA 101. Life Safety Code. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (15.08.2022).

90. Меженов, В.А. Методика определения геометрических размеров отверстий в камерах смешения пенных стволов, для создания пен низкой кратности // В.А. Меженов, И.А. Ольховский, С.С. Сергеев // Всероссийская научно-практическая конференция «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технологии предупреждения и профилактики возникновения чрезвычайных ситуаций – 2019»: сб. матер. – СПб.: Санкт-Петербургский Университет ГПС МЧС России, 2019. – С. 57–61.

91. Котоусов, Л.С. Исследование скорости водяных струй на выходе сопел с различной геометрией / Л.С. Котоусов // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – № 9. – С. 8–14.

92. СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности. [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 30.03.2020 г. № 225). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

93. СП 10.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. Нормы и правила проектирования. [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 27.07.2020 г. № 559). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

94. Ansys Fluent: Solver Theory Guide [Text] // ANSYS, Inc Southpointe. – 2011. – vol. 14.5. – 862 p.

95. Ansys Fluent: Users Guide [Text] // ANSYS, Inc. Southpointe. – 2011. – vol.14.5. – 2498 p.
96. Ansys Fluent: Tutorials [Text] // ANSYS, Inc. Southpointe. – 2011. – vol.14.5. – 146 p.
97. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
98. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
99. Волков, К.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
100. Егорычев, В.С. Моделирование двухфазных потоков в форсунке камеры ЖРД с помощью ANSYS CFD [Текст] / Л.С. Шаблий, И.В. Кудинов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 6-3. – С. 667–670.
101. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. – 478 с.
102. Ольховский, И.А. История и перспективы развития насосно-рукавных систем, комплексов и оборудования / И.А. Ольховский, А.Н. Лебедев, В.А. Меженков, А.А. Доротюк // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 4. – С. 57–61.
103. Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (15.08.2021).
104. Рукин, М.В. Пожарная безопасность объектов энергоснабжения [Электронный ресурс] / М.В. Рукин // Сборник статей ведущих специалистов рынка систем безопасности. – 1-е изд. – 2014. – С. 56–67. – Режим доступа: <https://www.egida-ross.ru/tekhpodderzhka/biblioteka-spetsialista/item/231->

sbornik-statej-2014-vedushchikh-spetsialistov-rynka-vzryvozhchishchennykh-sistem-bezopasnosti (дата обращения 12.09.2022).

105. Парлит, В.В. Гидравлические турбины / В.В. Парлит. – М.: Наука, 1987. – 328 с.

106. Юфин, А.П. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод: учебник для механ. фак. строит. вузов [Текст] / А.П. Юфин. – М.: Высш. школа, 1965. – 427 с.

107. Tao, Chen. An automatic fire searching and suppression system for large spaces / Tao Chen, Hongyong Yuan, Guofeng Su, Weicheng Fan // Fire Safety Journal. – 2004. –vol. 39. – Pp. 297–307.

108. ГОСТ Р 50898–96. Извещатели пожарные. Огневые испытания. [Электронный ресурс] национальный стандарт (принят и введ. в действие Госстандартом России от 24 апреля 1996 г., № 295). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

109. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022666148. Российская Федерация. Баллистика струи ствольной пожарной техники / В.А. Меженев, М.А. Грохотов, И.А. Ольховский; правообладатели В.А. Меженев, М.А. Грохотов, И.А. Ольховский; заявл. 11.08.2022; зарегистр. 25.08.2022; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 1. – 1 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Свидетельство ЭВМ

«Баллистика струй ствольной пожарной техники»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022666148**«Баллистика струи ствольной пожарной техники»**

Правообладатели: *Меженев Владимир Алексеевич (RU),
Грохотов Михаил Андреевич (RU), Ольховский Иван
Александрович (RU)*

Авторы: *Меженев Владимир Алексеевич (RU), Грохотов
Михаил Андреевич (RU), Ольховский Иван Александрович
(RU)*

Заявка № **2022665388**Дата поступления **11 августа 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **25 августа 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU **2022666148**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): <u>2022666148</u>	Авторы: Меженев Владимир Алексеевич (RU), Грохотов Михаил Андреевич (RU), Ольховский Иван Александрович (RU)
Дата регистрации: 25.08.2022	
Номер и дата поступления заявки: 2022665388 11.08.2022	Правообладатели: Меженев Владимир Алексеевич (RU) Грохотов Михаил Андреевич (RU) Ольховский Иван Александрович (RU)
Дата публикации: <u>25.08.2022</u>	
Контактные реквизиты: Грохотов Михаил Андреевич, 8-916-455-77-99; migrokhotov@yandex.ru	

Название программы для ЭВМ:
«Баллистика струи ствольной пожарной техники»

Реферат:

Программа позволяет провести расчет баллистических характеристик струй огнетушащего вещества при проектировании систем пожаротушения на базе пожарных лафетных стволов на объектах защиты различного класса функциональной пожарной опасности. Программа разрабатывалась на основе заложенного алгоритма с учетом физических особенностей полета капли огнетушащего вещества, как материальной точки в пространстве. В алгоритме учитываются входные данные, а именно физические особенности огнетушащего вещества (плотность, температура, агрегатное состояние огнетушащего вещества), и влияние окружающей среды на полет огнетушащего вещества (скорость ветра, температура, атмосферное давление). При изменении входных параметров (расхода огнетушащих веществ лафетного пожарного ствола, вида насадка ствола, температуры окружающей среды) проводится моделирование расчетного значения дальности и высоты подачи огнетушащих веществ. Программа предназначен для расчета баллистики струй при проектировании систем пожаротушения объекта защиты на базе пожарных лафетных стволов с учетом установления расчетного значения дальности и высоты подачи огнетушащих веществ из лафетного пожарного ствола. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК. ОС: Windows 98/2000/XP/Vista/7 и старше.

Язык программирования: MATLAB

Объем программы для ЭВМ: 40 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности начальника
специального отдела № 3
ФГКУ «Специальное управление
ФПС № 72 МЧС России»
подполковника внутренней службы



А.Г. Григоренко

«29» августа 2023 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
Меженова Владимира Алексеевича на тему: «Технология применения ствольной
техники с универсальными насадками для тушения пожаров машинных залов
электростанций» в практику противопожарной защиты машинных залов
Курской АЭС (Россия, Курская обл., г. Курчатов)

Комиссия в составе:

– ведущего инженера отдела пожарной безопасности Филиала АО «Концерн
Росэнергоатом» «Курская атомная станция» Варакута Александра Анатольевича;
– начальник отдела пожарной безопасности Филиала АО «Концерн
Росэнергоатом» «Курская атомная станция» Безносикова Владимира
Станиславовича

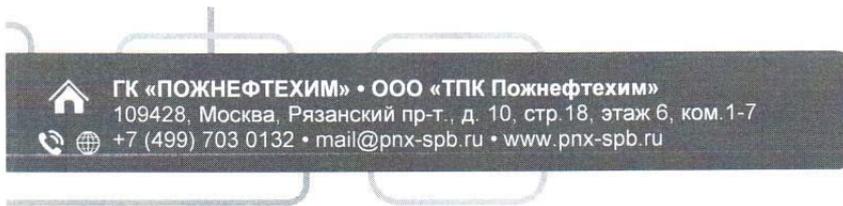
подтверждает, что результаты диссертационной работы Меженова
Владимира Алексеевича будут использоваться при разработке проектной
документации по оснащению роботизированными пожарными лафетными
с универсальными насадками и автономно-адаптивной системой управления при
модернизации противопожарной защиты машинных залов Курской АЭС, а также
при разработке планов пожаротушения и предупреждения чрезвычайных
ситуаций.

Ведущий инженер отдела пожарной безопасности
Филиала АО «Концерн Росэнергоатом»
«Курская атомная станция»

А.А. Варакута

Начальник отдела пожарной безопасности
Филиала АО «Концерн Росэнергоатом»
«Курская атомная станция»

В.С. Безносиков



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ТПК Пожнефтехим»



С.А. Панов

«09» июня 2020 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Комиссия в составе: заместителя директора по развитию Потеряева Ю.К., руководителя нормативно-технического отдела Титенкова С.В. и руководителя проекта производства пенообразователей Потапенко Т.В. составила настоящий акт о том, что при производстве и заводских испытаниях пожарных лафетных стволов была применена методика оценки площади орошения пожарными лафетными стволами, разработанная при участии инженера Меженова Владимира Алексеевича.

Предложенная методика даёт объективную оценку тактико-технических характеристик пожарным лафетным стволам с универсальными насадками, при их производстве и заводских испытаниях. Кроме этого, данная методика может стать основой разработки запрограммированных алгоритмов применения ствольной техники с универсальными насадками, при тушении различной горючей нагрузки, с разной интенсивностью горения и выделением теплового потока на объектах промышленности и производства.

Заместитель директора по развитию
ООО «ТПК Пожнефтехим», к.т.н.

Ю.К. Потеряев

Руководитель нормативно-технического
отдела
ООО «ТПК Пожнефтехим»

С.В. Титенков

Руководитель проекта производства
пенообразователей ООО «ТПК
Пожнефтехим», к.х.н.

Т.В. Потапенко

ООО «Торгово-Производственная Компания Пожнефтехим» входит в ГК «Пожнефтехим»
Проектирование систем пожаротушения. Консультации по техническим и коммерческим вопросам
ИНН 7709980842 КПП 772101001 ОГРН 5167746348424 ОКВЭД 46.90, 20.13, 33.14, 43.21, 46.75.2, 71.12

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Варгашинский завод ППСО»

В.Н. Казаков

2020 г.

«10»



АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы инженера Меженова Владимира Алексеевича

Комиссия в составе: первого заместителя генерального директора – главного инженера АО «ВзППСО» Емельянова Евгения Анатольевича, главного конструктора АО «ВзППСО» Смоленского Игоря Николаевича, составила настоящий акт о том, что на пожарной автоцистерне с системой обеспечения работоспособности насосно-рукавных систем в условиях низких температур окружающей среды АЦ-СОР 2,0-20/10 (43118), разработанной в рамках НИОКР АО «Варгашинский завод ППСО» совместно с Академией Государственной противопожарной службы МЧС России г. Москва были использованы научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы инженером Меженовым Владимиром Алексеевичем при исследовании вопросов, связанных с разработкой методики проведения испытаний АЦ-СОР 2,0-20/10 (43118).

Методика проведения испытаний содержит сведения о порядке проведения испытаний, основных критериях и видах проводимых испытаний.

Первый заместитель генерального директора – главный инженер

АО «ВзППСО»

«10» _____ 12 _____ 2020 г.

Е.А. Емельянов

Главный конструктор АО «ВзППСО»

«10» _____ 12 _____ 2020 г.

И.Н. Смоленский

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий ЗАО НПО
«Курганский завод СпецТехники»

В.В. Филимонов

«» 2020 г.**АКТ****Внедрения результатов диссертационной работы**

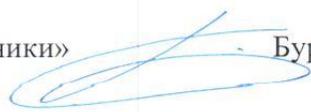
Комиссия в составе: главного инженера С.Д. Федорова и ведущего инженера-конструктора А.В. Бурдаева ЗАО НПО «Курганский завод СпецТехники» составила настоящий акт о том, что при производстве и заводских испытаниях пожарных лафетных стволов была применена методика оценки площади орошения пожарными лафетными стволами, разработанная в ходе выполнения диссертационной работы инженером Меженовым Владимиром Алексеевичем.

Предложенная методика даёт объективную оценку тактико-технических характеристик пожарным лафетным стволам с универсальными насадками, при их производстве и заводских испытаниях. Кроме этого, данная методика может в будущем стать основой разработки программных комплексов для автоматической регулировки факела распыла и определения требуемой площади орошения при тушении пожаров на объектах различных отраслей промышленности и производства.

Главный инженер

ЗАО НПО «Курганский завод СпецТехники»  Федоров С.Д.

Ведущий инженер-конструктор

ЗАО НПО «Курганский завод СпецТехники»  Бурдаев А.В.

УТВЕРЖДАЮ
 ВрИО начальника ГУ МЧС России
 по Иркутской области
 полковник внутренней службы
 В.С. Федосенко
 «16» января 2020 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Комиссия в составе: заместителя начальника ОТиТО УМТО, РИ ГУ МЧС России по Иркутской области подполковника внутренней службы П.Н. Мартынов, заместителя начальника 1 ПСО ФПС (г. Иркутск) ГУ МЧС России по Иркутской области подполковника внутренней службы Е.Г. Мужчинкина составила настоящий акт в том, что при эксплуатации пожарной автоцистерны АЦ-СОР 2,0-20/10 (43118) применяются тактические схемы и приемы использования автомобиля при тушении пожаров в условиях низких температур воздуха, разработанные в рамках научных исследований инженера Меженова А.А.

Заместитель начальника ОТиТО УМТО, РИ
 Главного управления МЧС России по Иркутской области
 подполковник внутренней службы П.Н. Мартынов

Заместитель начальника 1 ПСО ФПС (г. Иркутск)
 ГУ МЧС России по Иркутской области
 подполковник внутренней службы Е.Г. Мужчинкин

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии

ГПС МЧС России по учебной работе

кандидат исторических наук, доцент

В.С. Шныпко

2022 г.



АКТ

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 Меженова Владимира Алексеевича

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 Меженова В.А. 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