

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и
ликвидации последствий стихийных бедствий
Донецкой Народной Республики

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО ДЕЛА, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И
ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ «РЕСПИРАТОР»

На правах рукописи

УДК 622.822.7:614.844.2

Коляда Андрей Юрьевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ
ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ**

Специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность»
(по отраслям) (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Агеев Владимир Григорьевич

Идентичность всех экземпляров

ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.027.01 канд. техн. наук

И.Г. Старикова

Донецк – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1 Анализ пожароопасности подземных объектов угольной промышленности.....	12
1.2 Анализ существующих способов локализации подземных пожаров.....	22
1.3 Средства локализации и тушения подземных пожаров мелкораспыленной водой.....	27
1.4 Анализ методов расчета параметров средств локализации подземных пожаров мелкораспыленной водой.....	36
1.5 Цель и задачи исследований.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ.....	46
2.1 Теплообмен нагретых пожарных газов и мелкораспыленной воды в горных выработках.....	46
2.2 Баллистика капель мелкораспыленной воды в вентиляционном потоке горной выработки.....	56
2.3 Выбор и обоснование параметров центробежно-струйного распылителя.....	77
Выводы к разделу 2.....	93
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРА МЕЛКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ.....	95
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	95
3.2 Исследование расходной характеристики центробежно-струйного распылителя.....	110
3.3 Исследование распределения мелкораспыленной воды в горной выработке.....	112
3.4 Исследование процесса охлаждения пожарных газов мелкораспыленной водой.....	114

Выводы к разделу 3.....	119
4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	120
4.1 Методика расчета параметров противопожарной защиты подземных выработок водяными завесами.....	120
4.1.1 Методика расчета параметров локализации подземных пожаров водяными завесами.....	122
4.1.2 Методика расчета параметров локализации и тушения пожаров на приводных станциях ленточных конвейеров.....	130
4.2 Тактико-технические приемы локализации пожара на подземных объектах шахты.....	133
4.3 Разработка установки локализации пожаров мелкораспыленной водой в горных выработках.....	139
4.4 Оценка экономического эффекта от внедрения результатов работы.....	143
Выводы к разделу 4.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
Приложение А Справка о внедрении результатов диссертационного исследования на СП «Шахта им. В.И. Ленина ГП Артемуголь».....	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Подземные пожары относятся к наиболее сложным и опасным видам аварий, которые уничтожают дорогостоящее горно-шахтное оборудование, запасы добываемых полезных ископаемых, и нередко сопровождаются человеческими жертвами.

Характер развития пожара в горной выработке определяется степенью горючести находящихся в месте возникновения пожара материалов, их количеством, скоростью вентиляционного потока.

При увеличении скорости воздушного потока пожар развивается быстрее и интенсивней. Скорость пожара превышает скорость его тушения со стороны свежей струи, и ликвидировать пожар активным способом не представляется возможным. В этом случае для эффективного тушения пожара необходима его локализация со стороны исходящей струи.

В нашем исследовании локализация – это приостановление распространения пожара путем снижение температуры потока пожарных газов, прошедших через завесу, до значения ниже наименьшей температуры воспламенения горючих материалов, находящихся в выработке.

Согласно данным, приведенным в нормативно-технической документации на горючие материалы (Корольченко А.Я. «Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средств их тушения»), а также в исследованиях Демидова Г.П. и других ученых, древесина обладает наименьшей температурой воспламенения (255 °С) среди прочих горючих материалов в горной выработке (уголь, конвейерная лента, кабельная продукция и др.).

Таким образом, снижая температуру потока пожарных газов до 250 °С, мы исключаем возможность прогрева и воспламенения горючих материалов, расположенных за завесой.

Поэтому в настоящей диссертационной работе температура пожарных газов 250 °С выбрана в качестве граничной температуры, определяющей эффективность локализации.

Опыт борьбы с подземными пожарами показывает, что завесы применялись фактически на каждом втором пожаре, однако они были неэффективны, что объясняется несовершенством конструкции установок локализации пожара и неточностями методик расчета параметров завесы действующих нормативных документах по пожарной безопасности в угольных шахтах.

Кроме того, существующие в настоящий момент установки для создания завес обеспечивают реализацию своих параметров при давлении в противопожарном трубопроводе не менее 0,6 МПа, которое фактически отсутствует в шахтном противопожарном трубопроводе.

Следовательно, в настоящий момент методики расчета научно-обоснованных параметров эффективной локализации подземных пожаров водяными завесами, а также средства, создающие эти завесы и работающие в пределах реально существующих параметрах сети противопожарного водоснабжения, отсутствуют.

Таким образом, обоснование параметров эффективной локализации подземных пожаров с помощью водяных завес является актуальной научно-технической задачей, требующей своего решения.

Степень разработанности темы. Детальное изучение локализации очагов горения различных веществ диспергированной водой представлено в работах Абрамова Ю.А., Цариченко С.Г., Былинкина В.В., Шароварникова А.Ф., Пучкова С.Н., Шарикова А.В., Безродного И.Ф. и др.

В работах Козлюка А.И., Кушнарева А.М., Позднякова К.И., Лапина К.И., Ющенко Ю.Н. и других даны методы расчета нормативных расходов воды, необходимых для локализации подземных пожаров. Однако они не учитывают фактической пожарной нагрузки в горной выработке, конструктивных и гидравлических параметров применяемого пожарного оборудования.

В работах Ющенко Ю.Н. установлена эмпирическая зависимость доли испаряющейся жидкости от дисперсности воды в завесе и температуры газового потока. Это позволило обосновать нормы расхода воды на локализацию подземного пожара.

Однако отсутствуют ответы на вопросы, каким образом подать необходимое количество воды в выработку, чтобы доля испарившейся воды соответствовала нормативному значению, какой должна быть глубина завесы и распределение капель по сечению выработки, чтобы температура газового потока была снижена до безопасной.

Баллистика испаряющихся капель рассматривается в работах Олышанского В.П., Грицыной И.Н., Стрижака П.А., Волкова Р.С., Виноградова А.Г. Однако предлагаемые в этих работах зависимости не подходят для пространства, ограниченного поверхностью горной выработки.

Вышеизложенное выявило целесообразность исследования закономерностей теплообменного и гидравлического процессов при локализации пожаров в горных выработках угольных шахт и обоснования параметров средств локализации с использованием мелкораспыленной воды в целях повышения эффективности борьбы с подземными пожарами.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в рамках Программы «Мероприятия по реализации государственной политики в сфере гражданской обороны и обеспечения руководством единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций», раздел В – «Разработать Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Донецкой Народной Республики» утвержденной Министром по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики

25 марта 2015 г., «Разработать Методические указания по разработке проекта противопожарной защиты угольных шахт», утвержденной Министром по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики 23 декабря 2016 г., «Исследовать параметры подземных пожаров и разработать Руководство по определению параметров подземного пожара и выбору эффективных средств его тушения», утвержденной Министром по делам гражданской обороны,

чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики 25 декабря 2017 г.

Цель и задачи исследования. Цель работы – обоснование параметров эффективной локализации подземных пожаров завесами с мелкораспыленной водой на базе установленных зависимостей изменения температуры пожарных газов в процессе их взаимодействия с каплями воды при тепломассообмене.

В основу решения актуальной задачи положена идея совместного механизма теплового охлаждения потока пожарных газов и снижения в результате парообразования концентрации кислорода в этом потоке, что делает невозможным процесс воспламенения и горения горючих материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ методов исследования теплообменных процессов при пожарах в горных выработках;
- провести исследования, установить закономерности теплообменного процесса между потоком нагретых пожарных газов и мелкораспыленной водой и определить параметры водяной завесы для снижения температуры газов до безопасной величины;
- провести теоретические и экспериментальные исследования гидравлических процессов движения мелкораспыленной воды в горных выработках и обосновать выбор технического решения для получения требуемой дисперсности воды при нормируемом давлении в противопожарном трубопроводе;
- разработать математическую модель движения воды в распылительном устройстве (далее – распылитель) и обосновать его параметры для достижения требуемых размеров и дисперсности водяной завесы;
- выбрать рациональное размещение распылителей в защищаемой горной выработке и разработать метод расчета локализации пожаров на подземных объектах различного назначения.

Объект исследований – процессы тепломассообмена потока пожарных газов, образующихся при горении горючих материалов, и капель распыленной воды в водяной завесе, локализирующих подземный пожар.

Предмет исследований – параметры локализации подземного пожара водяными завесами, создаваемые с использованием распылителей воды в сети противопожарного водоснабжения.

Научная новизна полученных результатов:

– впервые установлено значение температуры пожарных газов после прохождения водяной завесы в процессе локализации пожара, которое позволило обосновать необходимое количество распыляемой воды, число распылителей, размеры локализующей пожар водяной завесы;

– впервые обоснованы параметры локализации подземного пожара водяными завесами с учетом взаимодействия потока пожарных газов и капель распыленной воды на участке пожара в зависимости от траектории и скорости полета капель воды и времени их испарения;

– впервые обоснованы параметры распылителей воды для создания водяных завес при пожаре в горной выработке путем оптимизации конструкции центробежно-струйного распылителя и использования, скорректированного критериального уравнения Пажи-Галустова, учитывающего скорости центрального и тангенциальных потоков воды в распылителе.

Теоретическое и практическое значение полученных результатов заключается в следующем:

– получены теоретические зависимости времени испарения капли и снижения температуры потока пожарных газов при его прохождении через завесу;

– получены зависимости распределения капель воды в горной выработке от их скорости и угла вылета из распылителя;

– рассчитан коэффициент распределения воды в факеле завесы;

– разработана конструкция центробежно-струйного распылителя;

– оптимизировано размещение распылителей по сечению выработки для локализации пожара;

– разработана и внедрена установка локализации пожаров.

Практическое значение полученных результатов заключается в разработке методики расчета параметров локализации пожара, которая вошла в Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Донецкой Народной Республики, Методических указаний по разработке проекта противопожарной защиты угольных шахт и Руководства по определению параметров подземного пожара и выбору эффективных средств его тушения.

Разработанные методологические основы локализации подземных пожаров и полученные в ходе исследований теоретические и экспериментальные результаты нашли практическое применение при локализации пожаров на шахте им. В.И. Ленина ГП «Артемуголь».

Методология и методы исследования.

При выполнении диссертационной работы использован комплексный подход, содержащий: анализ и обобщение результатов выполненных ранее исследований других авторов; математическое и физическое моделирование; теоретические методы, основанные на фундаментальных законах тепломассопереноса, механики сплошных сред, механики дисперсных сред при исследовании тепломассообменных процессов при локализации и тушении пожаров, баллистики испаряющихся капель мелкораспыленной воды в вентиляционном потоке горной выработки, движения жидкости в центробежно-струйном распылителе; аппарат теории дифференциальных уравнений и численных методов их решения при реализации математических моделей; методы математической статистики для обработки результатов экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость температуры потока пожарных газов после прохождения водяной завесы от расхода распыленной воды, времени полного испарения капли и геометрических размеров завесы, что позволяет рассчитать параметры завесы для снижения температуры пожарных газов до безопасной в пожарном отношении величины.

2. Зависимость траектории капель воды в пространстве горной выработки от скорости и направления вылета капли из распылителя, ее времени испарения,

температуры и скорости попутного потока пожарных газов, что позволило сформулировать и реализовать математическую модель для определения доли воды, осевшей на поверхности выработки, и доли испарившейся воды при локализации пожара.

3. Зависимость скорости центрального и тангенциальных потоков жидкости в центробежно-струйном распылителе от размеров соответствующих каналов и расхода воды, что позволило получить математическую модель для определения параметров завесы обеспечивающей локализацию пожара.

Личный вклад соискателя состоит в формировании целей и задач исследований, научных положений и выводов; проведении теоретических исследований теплообмена и баллистики капель в потоке пожарных газов; проведении экспериментальных исследований по определению параметров водяной завесы; разработке центробежно-струйного распылителя и установки локализации пожаров в горной выработке; обобщении и систематизации результатов; разработке методики локализации подземных пожаров, вошедшей в нормативно-технические документы по пожарной безопасности угольных предприятий Донецкой Народной Республики.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена соответствием полученных зависимостей основным законам о протекании тепломассообменных процессов, о процессах механики сплошных и дисперсных сред; необходимым и достаточным объемом экспериментальных данных; удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных данных, а также согласованностью результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными других исследователей.

Основные положения диссертации и отдельные ее части докладывались на семинарах и научных советах НИИГД «Респиратор», Международной конференции «Форум горняков» (г. Днепропетровск, Украина, 2009), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, Российская Федерация, 2010), X Международной конференции

«Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (г. Тирасполь, 2017 г.), XII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященная Году пожарной охраны (г. Иваново, Российская Федерация, 2017 г.), Первой Республиканской научной конференции, посвященной Дню гражданской обороны в ДНР, 85-летию образования гражданской обороны и образованию Академии гражданской защиты МЧС ДНР (г. Донецк, Донецкая Народная Республика, 2017 г.), Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» в рамках XXX международной специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (г. Новокузнецк, Российская Федерация, 2022 г.).

Результаты работы доложены и обсуждены на заседании Ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 2 от 27.05.2021).

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований изложены в 18 печатных работах, в том числе: 13 работ опубликованы в рецензируемых изданиях ВАК Минобрнауки ДНР и 5 доклада в материалах международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части (из четырех разделов), заключения (с основными выводами), списка литературы из 118 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 31 рисунок и 18 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ пожароопасности подземных объектов угольной промышленности

Угольная промышленность характеризуется сложностью горно-геологических условий и технологических процессов по добыче угля, в связи с чем, несмотря на принимаемые меры по совершенствованию техники безопасности, остается наиболее потенциально опасной по возникновению чрезвычайных ситуаций отраслью народного хозяйства.

Горное производство отличается многообразием имеющихся потенциальных опасностей природного и техногенного характера. Современные угольные шахты представляют собой высокомеханизированные предприятия с развитой электрической сетью и большим количеством машин и механизмов. Эксплуатация технологического оборудования в шахтах имеет специфические особенности, повышающие опасность его использования, а именно: непрерывное подвигание фронта работ требует перемещения оборудования и наращивания сетей, причем эти работы необходимо выполнять в ограниченном пространстве с возможными обрушениями, обвалами, выделением метана. С ростом энерговооруженности угольных шахт увеличивается вероятность возникновения подземных пожаров, связанных с применением электроэнергии.

Научно-технический прогресс обуславливает рост технического уровня горных машин и механизмов, все более широкое внедрение получают механизированные и автоматизированные комплексы. Наблюдается совершенствование противоаварийной защиты угольных предприятий, повышение эффективности дегазации, обеспыливания, борьбы с пожарами, взрывами, газодинамическими явлениями и т.д. Закрываются нерентабельные и работающие в сложных горно-геологических условиях шахты. Эти факторы дают основания ожидать устойчивой тенденции к уменьшению количества подземных аварий.

Однако наблюдаются и совершенно другие процессы. Угледобывающий комплекс страны претерпевает серьезные структурные и экономические изменения. Это, прежде всего, повышение уровня экономической самостоятельности шахт на фоне ослабления централизованного управления и значительного снижения финансирования программ, направленных на повышение противоаварийной защиты. Резкое снижение инвестиций в угольную отрасль привело к замедлению темпов обновления основных фондов, старению шахт и вынужденному отказу от их реконструкции.

Все это в значительной мере нивелирует благоприятное воздействие научно-технического прогресса на состояние противоаварийной защиты. К тому же из альтернативных средств защиты зачастую выбираются не технически целесообразные, а те, выбор которых обусловлен коммерческими интересами заинтересованных лиц. В результате состояние противоаварийной защиты на большинстве шахт остается неудовлетворительным, а принимаемые меры по предупреждению подземных пожаров недостаточными.

Особую опасность для угольных шахт представляют подземные пожары. Неудовлетворительное состояние пожарной безопасности не может быть объяснено только безответственностью руководителей и исполнителей работ, оно связано с тенденцией развития горнодобывающей отрасли, с широким применением в подземных условиях шахт резинотехнических, синтетических и других горючих материалов и изделий. В настоящее время в выработках угольных шахт Донбасса и Украины эксплуатируется, в частности, около 2000 км конвейерных лент, 800 км гибкого электрического кабеля и 900 км гибких вентиляционных труб.

Минеральное масло, конвейерные ленты, оболочки гибких электрических кабелей и другие горючие материалы в сочетании с углем и метаном создают горючую среду, способную воспламениться даже от кратковременного действия маломощных тепловых источников.

Из 259 шахт, находившихся по состоянию на 01.01.2013 г. на территории Украины (25 находились в стадии реструктуризации), 88 отнесены к сверхкатегорным и третьей категории по метану; 59 шахт отрабатывают

шахтопласты, опасные по внезапным выбросам угля и газа; 121 шахта отнесена к опасным по взрывчатости угольной пыли; 11 шахт отрабатывают пласты, склонные к самовозгоранию; 48 шахт ведут работу на глубине от 500 до 700 м, 51 шахта до 1000 м, а 27 шахт добывают уголь на глубине свыше 1000 м.

На обслуживаемых Государственной военизированной горноспасательной службой (далее – ГВГСС) в угольной промышленности объектах Украины за период с 2010 по 2013 гг. имели место 339 аварий и аварийных ситуаций. Из имевших место за этот период 173 (51,0 %) аварий 49 (28,3 %) составляют подземные пожары (42 экзогенных и 7 эндогенных), 17 (9,8 %) взрывы газа и угольной пыли, 11 (6,3 %) – внезапные выбросы угля и газа, 56 (32,4 %) – обрушения, 4 (32,3 %) – затопление горных выработок, 36 (20,8 %) аварии на поверхности (таблица 1.1). Из общего числа аварий наибольший удельный вес занимают подземные пожары [1].

Угольная промышленность Донецкой Народной Республики (далее – ДНР) включает 40 шахт. Анализ аварийности за 2014 – 2020 гг. показал, что на шахтах ДНР имело место 293 аварий и аварийных ситуаций. Из имевших место за этот период 72 аварий 16 составляют подземные экзогенные пожары, 1 эндогенный пожар, 8 – взрывы газа и угольной пыли, 4 – внезапные выбросы угля и газа, 14 – обрушения, 3 – затопление горных выработок, 26 аварии на поверхности (таблица 1.2) [2, 3].

На протяжении последних лет не выполняются требования вышестоящих органов о замене на больший диаметр противопожарных трубопроводов магистральных конвейерных и подводящих к ним выработок для обеспечения нормативного расхода воды для целей пожаротушения. Так, в 2013 г. при плане замены противопожарных трубопроводов диаметром 100 мм в магистральных конвейерных и подводящих к ним выработок общей длиной 20,7 км фактически заменено только 5,1 %.

Таблица 1.1 – Аварийность на предприятиях угольной промышленности Украины за период 2010-2013 гг.

Показатели	Годы				Всего за 2010- 2013 гг.	Среднее значение 2010- 2013 гг.
	2010	2011	2012	2013		
Всего аварий и аварийных ситуаций	86	93	80	80	339	85
Всего аварий	42	53	38	40	173	43
В том числе подземных пожаров, всего/ %	<u>12</u> 28,6	<u>14</u> 26,4	<u>12</u> 31,6	<u>11</u> 27,5	<u>49</u> 28,3	<u>12</u> 28,0
Экзогенных, всего/ %	<u>11</u> 91,7	<u>12</u> 85,7	<u>10</u> 83,3	<u>9</u> 81,8	<u>42</u> 85,7	<u>11</u> 92,0
Эндогенных, всего/ %	<u>1</u> 8,3	<u>2</u> 14,3	<u>2</u> 16,7	<u>2</u> 18,2	<u>7</u> 14,3	<u>2</u> 17,0
Взрывов газа и угольной пыли	5	5	4	3	17	4
Внезапных выбросов	4	1	2	4	11	3
Обрушений пород	13	18	13	12	56	14
Затоплений	-	2	1	1	4	1
Аварий на поверхности	8	13	6	9	36	9

Таблица 1.2 – Аварийность на предприятиях угольной промышленности Донецкой Народной Республики
за период 2014-2020 гг.

Показатели	Годы							Всего за 2014-2020 гг.
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Всего аварий и аварийных ситуаций	47	50	25	84	35	27	25	293
Всего аварий	18	11	6	10	13	1	13	72
В том числе пожаров, всего/ %	<u>7</u> 38,9	<u>2</u> 18,2	<u>1</u> 16,7	<u>1</u> 10,0	<u>1</u> 7,7	-	<u>5</u> 38,5	<u>17</u> 23,6
Экзогенных, всего/%%	<u>7</u> 100	<u>2</u> 100	<u>1</u> 100	<u>1</u> 100	<u>1</u> 100	-	<u>4</u> <u>80</u>	<u>16</u> 97,0
Эндогенных, всего/ %	-	-	-	-	-	-	<u>1</u> 20	<u>1</u> 3,0
Взрывов газа и угольной пыли	2	1	-	1	1	-	3	8
Внезапных выбросов	4	-	-	-	-	-	-	4
Обрушений пород	1	4	-	1	4	-	4	14
Затоплений	-	1	-	1	1	-	-	3
Аварий на поверхности	4	3	5	6	6	1	1	26

Из-за недостаточного приобретения труб на шахтах не выполняются работы по приведению в соответствие с проектами противопожарной защиты (далее – ППЗ) схем подачи воды с поверхности на действующие горизонты.

На протяжении последних лет обеспеченность горных выработок противопожарным трубопроводом поддерживается на уровне 85 %, выполнение графиков прокладки недостающих трубопроводов составляет не более 18 %, при этом годовые графики прокладки разрабатываются, исходя из реальных возможностей предприятий.

Приобретенного объема труб диаметром 100 мм и более по всем предприятиям для всех нужд: в 2020 году – 0 км, в 2019 году – 6,72 км, в 2018 году – 13,09 км, в 2017 году – 6,57 км достаточно только для поддержания действующей линии очистных и подготовительных забоев.

В 2020 году на обслуживаемых предприятиях противопожарного трубопровода от требуемого недостает 170,22 км (в 2019 году 172,89 км), фактически проложено 0 км, что составляет 0% (в 2019 году 12,27 км, что составляет 7%) от общей протяженности недостающих трубопроводов. Замена непригодных по причине износа трубопроводов при планируемом объеме 1,85 км, фактически заменено 0,53 км или 28,65 % от плана.

Недостаточное приобретение труб диаметром 150 мм является основной причиной невыполнения графиков замены противопожарных трубопроводов диаметром 100 мм, которые эксплуатируются в магистральных конвейерных и подводящих к ним выработках.

Цель этой замены – обеспечить расход воды в пожарно-оросительных трубопроводах магистральных конвейерных выработок не менее 100 м³/час.

На протяжении 5 лет предприятиями не выполняются работы по замене противопожарных трубопроводов на больший диаметр в магистральных конвейерных и подводящих к ним выработках для обеспечения нормативного расхода воды для целей пожаротушения.

В 2020 году не выполнены работы по приведению магистральных конвейерных и подводящих к ним выработок, в связи с тем, что пожарно-оросительные трубопроводы диаметром 100 мм были приобретены в недостаточном количестве предприятиями. На 5 шахтах планируемые замены не выполнены.

Из-за недостаточного приобретения предприятиями труб на 15 шахтах не выполняются работы по приведению в соответствие с проектами, схем подачи воды с поверхности в шахту и на действующие горизонты.

По состоянию на 2020 год магистральных специальных пожарно-оросительных трубопроводов установленных в стволах на 11 шахтах недостает 8,33 км, что составляет 21,4 % от требуемого количества, а магистральных резервных пожарно-оросительных и трубопроводов в стволах недостает 3,84 км на 4 шахтах, что составляет 13,5 % от требуемого количества.

По результатам целевой проверки «Состояние противопожарной защиты горных выработок и поверхностных комплексов угольных предприятий», проведенной командным составом ГВГСС в 2020 году, выявлено, что не выполняются предусмотренные проектом водоснабжение промплощадок. На поверхностных объектах основных и вспомогательных промплощадок невозможна подача воды на 201 объект 26 шахт, по причинам отсутствия и нарушения эксплуатации резервуаров – 12, отсутствия и неисправность насосных станций – 3, неисправность водоема и отсутствие воды в нем – 24, неисправность трубопроводов – 99.

В сложившейся ситуации необходимо принятие мер для восстановления противопожарного водоснабжения шахт.

В то же время используемая на шахтах трубопроводная арматура устарела и ненадежна в эксплуатации. Отсутствует очистка трубопроводов. В связи с этим участились случаи нехватки или полного отсутствия воды в трубопроводах, что приводит к усложнению борьбы с возникающими пожарами. Нерациональное планирование горных работ, связанное с прирезкой шахтных полей и отработкой запасов по временным схемам, обуславливает возникновение участков, нормальное водоснабжение которых возможно только с использованием дополнительных

насосов, повышающих напор сети. Однако работа таких насосов не согласуется с мероприятиями плана ликвидации аварии, предусматривающими полное отключение электроэнергии в шахте.

Таким образом, одной из проблем борьбы с подземными пожарами является обеспечение задействованных средств пожаротушения необходимым количеством воды. Горноспасателями и инженерно-техническими работниками шахты, участвующими в ликвидации пожара, прилагаются огромные усилия для того, чтобы создать на аварийном участке требуемые напор и расход воды и обеспечить пропускную способность противопожарного трубопровода. В результате ликвидация подземных пожаров зачастую приводит к огромным экономическим и социальным потерям.

Наиболее опасные в аварийном отношении объекты – очистные забои, подготовительные и протяженные конвейерные выработки, сопряжения лав с конвейерными и откаточными штреками, выработки с горючей крепью, тупиковые выработки, погрузочные пункты лав, угольные бункеры и пересыпы на транспортной цепочке. Они оборудованы средствами защиты, стоимость которых не превышает 3 % от стоимости самого объекта. В то же время материальные потери от пожаров на этих объектах в 3 – 5 раз превышают средние значения затрат на их противопожарную защиту. Особую пожарную опасность представляют выработки, оборудованные ленточными конвейерами. Так, по оценкам, приведенным в работе [4], материальные потери при пожарах в длинных конвейерных выработках могут превышать 15 – 30 млн. рос. руб., при этом из строя выводится большая часть оборудования и требуются значительные расходы на его восстановление.

Суммарная протяженность выработок, оснащенных ленточными конвейерами, на шахтах Украины и Донецкой Народной Республики составляет более 900 км.

По результатам обследования угольных шахт установлено, что за последние годы постоянно растет количество конвейерных установок, не прошедших ревизию и наладку, почти половина (49 %) конвейерных установок не полностью укомплектованы системами автоматического контроля и защиты, не имеют

блокировки работы при снижении давления воды в противопожарном трубопроводе – 48 %, контроля бокового схода ленты – 17 %, работают с перегрузкой горной массы на следующий конвейер – 74,8 %, при этом значительная часть установок не имеют контроля допустимого уровня загрузки в местах пересыпа, не обеспечены контролем скорости движения конвейерной ленты.

Необходимо также учесть, что около 60 % конвейерных лент находится в эксплуатации более двух лет, а 40 % – пять лет и более. Превышение установленных сроков эксплуатации приводит к значительному износу и резкому повышению пожарной опасности лент в связи с истиранием рабочей и ходовой обкладок, обрыва бортов ленты. Это привело к тому, что на некоторых шахтах сложилась крайне пожароопасная ситуация.

Горные выработки, оборудованные ленточными конвейерами, имеют высокую пожарную нагрузку (горючая трудновоспламеняемая конвейерная лента, деревянные элементы крепи, трапы, электрические кабели, уголь). В этих выработках ежегодно происходит от двух до пяти пожаров с большими материальными ущербами и даже с человеческими жертвами.

При воспламенении движущейся конвейерной ленты зона горения перемещается по проветриваемой выработке на значительные расстояния, что сопровождается полным выгоранием крепи, обрушениями кровли, нарушением проветривания, загазованием выработок до взрывоопасной концентрации. Например, 21 декабря 2016 г. возник экзогенный пожар в конвейерной выработке 5-й северной лавы пл. l_3 блока 5 выемочного участка ГУП ДНР «Шахта «Комсомолец Донбасса». Попытка локализации пожара с применением установки ВВР-1 не удалась, и было решено изолировать аварийный участок взрывоустойчивыми перемычками. Общий ущерб от аварии превысил 3,71 млн. руб.

Выпускаемая отечественными предприятиями транспортерная лента по огнестойкости низкого качества и дорабатывается, обычно, до полного износа обкладочного слоя. Конвейерные установки эксплуатируются, как правило, без обслуживания, зачастую с заштыбованными барабанами и не вращающимися

роликами. Контрольно-измерительная аппаратура натяжения и скорости движения ленты должна отключать ленточный конвейер при нарушениях технологических параметров его работы (скорость ленты, натяжение, сход ленты и др.). Но из-за повсеместного «загрубления» и отключения она не выполняет свои функции. Средства автоматического пожаротушения имеются только на приводных и отчасти на натяжных станциях. Однако и они часто находятся в неработоспособном состоянии. На линейной части, несмотря на требования нормативных документов и ППЗ, средства автоматического пожаротушения отсутствуют. На шахтах отсутствуют централизованный контроль за давлением воды в противопожарном трубопроводе с выводом информации на пульт диспетчера. Нет блокировки систем управления конвейерами, не допускающей их включение при падении давления воды в трубопроводе ниже нормативного давления. Это касается даже шахт, оснащенных общешахтной телекоммуникационной системой безопасности УТАС. На остальных выше перечисленных пожароопасных объектах системы автоматического водяного пожаротушения вообще отсутствуют.

Основными причинами возникновения пожаров на ленточных конвейерах являются заштыбовка приводных и натяжных барабанов, несущих роликов, перегруз конвейеров в процессе транспортировки угля и породы, несвоевременная замена неисправных роликов, эксплуатация ленты с поврежденными бортами, использование деревянных стоек для предотвращения бокового схода ленты, эксплуатация конвейеров при неисправных реле-скоростей и т.д [5].

Основными причинами развития пожара на ленточных конвейерах являются:

- отсутствие или неисправность средств автоматического контроля работы ленты и автоматических средств пожаротушения;
- малое давление (менее 0,1 МПа) или полное отсутствие воды в противопожарном трубопроводе и недостаточный ее расход для тушения пожара;
- позднее обнаружение пожара на линейной части конвейера из-за отсутствия средств пожарной сигнализации и обслуживающего персонала в камерах приводов конвейеров и на пунктах пересыпа угля, хотя шахты согласны организовать это обслуживание взамен на отказ от оснащения камер системами пожаротушения.

Наиболее тяжелые последствия возникают при пожарах на линейной части мощных многоприводных магистральных конвейеров в наклонных выработках шахт, таких, как уклоны, бремсберги, наклонные стволы, через которые идут большие потоки транспортируемого угля и горной массы.

Сокращение экономических последствий подземных пожаров возможно лишь при условии их ликвидации (или, по крайней мере, локализации) в начальной стадии развития, что требует наличия достаточной и эффективно действующей противопожарной защиты. Это возможно, если у очага экзогенного пожара окажутся работники шахты, обученные пользованию первичными средствами пожаротушения, а последние находятся в необходимом количестве в установленных местах.

Успешная локализация пожара возможна при установке в требуемых местах водяных или водо-пенных завес с расходом, отвечающим требованиям нормативных документов. Таким образом, расчет параметров этих завес и нормативное регламентирование рассчитываемых параметров является актуальной отраслевой задачей, что предопределяет научно-практическую значимость настоящей диссертационной работы.

1.2 Анализ существующих способов локализации подземных пожаров

Степень развития экзогенного пожара характеризуется следующими стадиями:

- разгорание, которое характеризуется нарастанием количества сгорающего в единицу времени материала и расхода воздуха на горение;
- развившийся пожар, когда практически полностью расходуется кислород воздуха на горение и при постоянном расходе воздуха сгорает постоянное количество материала в единицу времени;
- затухание, которое характеризуется снижением концентрации пожарных газов и нарастанием в продуктах горения концентрации кислорода.

Развившийся пожар условно делится на следующие зоны:

1. Зона охлаждения. Она образуется после сгорания шахтной крепи, в результате охлаждения горного массива воздухом.

2. Зона догорания (зона тления), в которой образованный древесный уголь окисляется кислородом воздуха.

3. Зона горения летучих веществ выделившихся при пиролизе древесины.

4. Зона предварительного прогрева деревянной крепи и деревянных материалов.

Тушение развившихся подземных пожаров осуществляется комбинированным способом, т.е. сочетанием активного способа тушения со стороны свежей струи и локализация пожара.

Локализация пожара – это приостановка продвижения пожара по выработке за счет охлаждения продуктов горения до температуры ниже температуры воспламенения горючих материалов в горной выработке.

Таким образом, ликвидируется зона предварительного нагрева, и пожар прекращает свое продвижение.

Локализация осуществляется:

- установкой водяных или пенных завес на пути распространения пожара;
- удалением горючих материалов на пути распространения пожара;
- созданием препятствия на пути распространения пожара (закрытие противопожарных дверей, возведение негорючих перемычек);
- сокращением подачи свежего воздуха к очагу горения;
- подачей инертных газов;
- созданием условий для рециркуляции продуктов пожара в замкнутом контуре;
- изменением вентиляционного режима;
- сочетанием приведенных выше способов.

Основным способом, применяемым в настоящее время, является установка водяных завес.

Основными задачами устройства водяных завес на пути распространения пожара являются предотвращение возможности проникновения огня и нагретых пожарных газов в примыкающие к аварийному участку выработки.

Тактико-техническими приемами локализации подземных пожаров предусмотрено, что водяную завесу следует располагать как можно ближе к очагу пожара [6, 7].

До настоящего времени научно-обоснованные методики расчета параметров водяных завес, образуемых мелкораспыленной водой, отсутствуют.

Работники горноспасательной службы используют Методику определения водяных завес, приведенную в [8].

Этой Методикой предусмотрено определение следующих параметров водяной завесы:

- количество распылителей в одном эшелоне;
- количество эшелонов;
- температура продуктов горения после прохождения водяной завесы.

Как показал опыт ведения горноспасательных работ по локализации подземных пожаров, рассчитанные по этой методике завесы, зачастую являются не эффективными.

Так, за последние 10 лет в шахтах Украины и ДНР установки для создания завес применялись в 40 случаях из произошедших за этот период 65 пожара, т.е. фактически на каждом 2 пожаре.

При этом 65% установленных завес не сыграли своей роли и были преодолены пожаром.

Особенно опасным является случаи пожаров на выемочных участках, когда пожары из призабойного пространства лавы проникают в выработанное пространство и потушить его активным способом уже не удастся, приходится прибегать к изоляции пожарного участка.

Требования по установке на сопряжениях лавы водяных завес, которое имело место в [9], в ныне действующих нормах [10] по требованию собственников

угольных шахт были сняты, что привело к значительному росту пожароопасности выемочных участков.

В качестве примеров неэффективной локализации рассмотрим пожары, произошедшие в последние годы на шахтах ДНР и Украины [11-19].

26 января 2014 г. возник пожар в конвейерной выработке 2 западной лавы пл. 1₇ блока 5 шахты «ДТЭК шахта Комсомолец Донбасса».

Одним из мероприятий разработанного оперативного плана ликвидации аварии были: прокладка рукавной линии от ближайшего пожарного крана на вентиляционном штреке 3 западной лавы пл. 1₇ и установка в конвейерной выработке 2 западной лавы пл. 1₇ ближе к обуренной части установки локализации пожара со стороны исходящей струи воздуха.

Однако в стесненных условиях аварийной выработки применение установки локализации пожара было признано не целесообразным, и вместо нее был установлен пожарный ствол «Rambojet», включенный в работу в режиме распыления.

Однако использование дорогостоящего водно-пенного раствора «Ругосоол» для создания локализирующей завесы оказалось неэффективным. Кроме того, из-за неисправностей запорной арматуры периодически возникали перебои с водоснабжением аварийного участка.

Пожар преодолел завесу и распространился далее по 3 западной лаве пл. 1₇. Доступ к очагу пожара стал невозможным. В связи с этим было принято решение изолировать аварийный участок взрывоустойчивыми перемычками на безопасном расстоянии и затопить его.

04 сентября 2014 г. на шахте «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» в 162 «бис» лаве в районе секций № 1-3 возник пожар.

Прибывшие по вызову горноспасатели для локализации пожара на сопряжениях 162 «бис» лавы со стороны 162 бортового и 164 сборного штреков установили 2 установки локализации пожара и к ним проложили высоконапорные рукава.

Но поставленные завесы оказались неэффективны, и пожар преодолел их и распространился по выработанному пространству лавы 162 «бис».

В связи с этим было принято решение изолировать выработки всего западного крыла шахты 5-ю взрывоустойчивыми перемычками на безопасном расстоянии.

11 сентября 2013 г. в 4-м восточном штреке пл. k_6 ОП «Шахта имени Артема» ГП «Луганскуголь» возник пожар.

Локализация пожара произведена с помощью 2 установок локализации, установленных в квершлаг пл. k_7 – k_5 гор. 510 м в 20 м от сопряжения обходной западной коренной лавы пл. k_7 гор. 510 м против исходящего потока пожарных газов.

Однако пожар преодолел завесу и распространился далее по выработке, где вследствие слоевого выделения метана из погашенной части 4-го восточного штрека пласта k_6 образовалась горючая концентрация метана. Ее воспламенение, сопровождающееся взрывом, привело к групповому несчастному случаю.

Таким образом, причинами неудачной локализации многих подземных пожаров распыленной водой являются:

- отсутствие научного обоснования параметров локализации пожаров водяными завесами;
- несоответствие расхода воды на локализацию существующим нормативным параметрам;
- образование в существующих установках локализации пожара капель воды больших размеров, что приводит к их интенсивному осаждению и уменьшению теплообмена с пожарными газами за счет испарения;
- несовершенство образуемых установками факелов распыленной воды, что дает возможность обхода завесы открытым пламенем или нагретыми газами по куполам или пустотам за крепью выработки, пустотам в самом факеле незаполненным каплями;
- несоответствие давления воды в противопожарном трубопроводе требуемым нормативным значениям вследствие значительного износа и аварийного состояния трубопровода;

– отсутствие тактико-технических требований к размещению установок локализации на различных подземных объектах шахты.

Следовательно, задача локализации подземных пожаров распыленной водой в настоящее время не решена. Необходимо провести исследования механизма теплообмена пожарных газов и распыленной воды, условия образования полнозаполненного факела распыленной воды, перекрывающего все сечение аварийной выработки, разработать новую конструкцию распылителя и механизм смешивания отдельных потоков воды, что позволит создать полнозаполненный факел воды.

1.3 Средства локализации и тушения подземных пожаров мелкораспыленной водой

Для локализации и тушения пожара в горной выработке получили широкое применение автоматические системы водяного пожаротушения.

В странах с развитой угольной промышленностью разработка средств пожаротушения велась по двум направлениям.

К первому относились установки, у которых в побудительной линии использовали тросовую систему с легкоплавкими замками и гидравлическую или пневматическую систему со спринклерными головками и тепловым замком. Установки с тросовой системой широко применяли в СССР и Великобритании, а в Германии, Японии и Китае широко применяли побудительную гидравлическую или пневматическую систему.

Ко второму направлению относились установки, в которых в качестве побудительной системы использовали электрическую аппаратуру обнаружения загорания с пожарными извещателями, реагирующими на тепло и дым.

В практике зарубежных государств, в частности на шахтах Германии широко применяли водяные установки фирм «Total Walter», «CEAG» и «Konflow» [20]. Эти установки предназначались для защиты приводных и натяжных барабанов и подключались к противопожарному трубопроводу. В их состав входили

автоматическое запорно-пусковое устройство, срабатывающее за счет разности давлений в побудительном и подводящем трубопроводе. Для запуска применяли тепловые датчики максимального действия – спринклеры с патроном «Эсти».

В Великобритании для защиты приводных станций применяли установку пожаротушения, в состав которой входили запорно-пусковой клапан, побудительное устройство на базе тросовой системы и разветвленный перфорированный трубопровод. Однако, как показала практика использования установки УАК-2, поддержание тросовой системы в работоспособном состоянии в шахтных условиях затруднительно из-за частого разрушения теплового замка.

Во Франции применяли установку, запуск которой осуществлялся с помощью датчиков с плавким элементом или воспламеняющимся шнуром, а подача воды осуществлялась от противопожарного трубопровода.

В Японии нашли широкое применение установки водяного и водопенного принципа действия, в побудительной системе которых применяли спринклерные головки, срабатывающие при температуре 70 – 80 °С.

Эта система содержала ряд равномерных по длине участка действия средств пожарной сигнализации и тушения, каждое из которых было смещено относительно друг друга на половину длины участка. Каждый участок сигнализации и тушения включал в себя трубопровод системы водяного пожаротушения с оросителями и автоматическим клапаном. При срабатывании пожарного извещателя формировалась зона орошения, длина которой была равна двум длинам смежных участков. Недостатком этой системы было то, что она не обеспечивала тушение пожара по длине, превышающей длину двух смежных участков тушения, кроме того, возврат системы в исходный ждущий режим производился вручную.

В странах СНГ для пожарной защиты приводных станций ленточных конвейеров применяли разработанную в НИИГД «Респиратор» установку УАК-2М, побудительная система которой представляла собой тросовую систему с тепловыми замками ЗТ-47.

С целью расширения области применения по рабочему давлению, а также для упрощения конструкции и увеличения ее надежности были разработаны установки

водяного пожаротушения с безтросовой системой пуска – АВР, «Туман», УСВМ. В этих установках для запуска были применены разработанные НИИГД «Респиратор» пожарные извещатели ИПТ-1 и пусковое устройство «Пуск-1».

Установки «Туман» и пенного пожаротушения «Снег» были предназначены для тушения пожаров на линейной части конвейера. Однако широкое применение установка «Туман» не получила, так как имела малую зону защиты (около 8 – 10 м периметра выработки и ленты).

В установке «Снег» был заложен принцип заполнения конвейерной выработки пеной до высоты, превышающей высоту конвейера на 0,3 м. Длина зоны защиты установки в зависимости от угла наклона выработки $(0 - 18)^\circ$ составляла от 20 до 110 м.

В НИИГД «Респиратор» была разработана автоматическая водоразбрызгивающая установка УВГ-1 для тушения пожаров на приводных головках ленточных конвейеров и создания водяной завесы, препятствующей дальнейшему распространению пожара. Она состояла из системы разводящих трубопроводов, винтовых водоразбрызгивателей, задвижки для отключения установки от противопожарного трубопровода, фильтра и автоматического клапана. В ее состав также входил пожарный извещатель типа ИПТ-1 и пусковое устройство, обеспечивающее автоматическое срабатывание установки.

Для оперативного создания водяной завесы и ликвидации пожара была разработана переносная установка ВВР-1, которая состояла из специального трубчатого тройника, входное отверстие которого оборудовалось пожарной гайкой для подсоединения пожарного рукава, а два выходных – резьбой для ввинчивания распылительных оросителей. Заодно с корпусом-тройником было отлито зажимное приспособление для фиксирования его на досках, бортах шахтной вагонетки в горизонтальном положении или по оси выработки.

Автоматическая установка УВЗ-2 предназначалась для пожарной защиты и локализации подземного пожара в вентиляционных штреках на расстоянии не более 50 м от выхода из лав. Принцип ее работы заключался в том, что при превышении

температуры воздуха свыше 72 °С легкоплавкий замок спринклерного оросителя плавился, вследствие чего клапан открывался и пропускал воду из противопожарного трубопровода к полидефлекторным водоразбрызгивателям.

В настоящее время для локализации и тушения пожара в горной выработке используются различные способы и средства пожаротушения.

Это автоматическая система водяного пожаротушения АУВП-«ЮРЕК-6», которая является средством для подавления (тушения) локальных очагов горения твердых веществ пожаро-и взрывоопасных производств путем механического срыва пламени сильной струей воды, охлаждения и изолирования зоны горения. АУВП также применяется для объемного тушения в помещениях, отсеках, галереях.

Система предназначена для тушения пожара на ленточном конвейере, возникшего при пробуксовке ленты на приводном барабане, при загорании электрических двигателей привода конвейера, а также для защиты пункта перегруза сыпучих материалов с конвейера на конвейер.

В России для противопожарной защиты приводных станций ленточных конвейеров применяются системы водяного пожаротушения УВПК-1М и УПТЛК.

Система водяного пожаротушения УВПК-Б1 используется для тушения распыленной водой пожаров на приводных станциях различных типов ленточных конвейеров, применяемых в угольных шахтах, в том числе опасных по газу и пыли, а также на ленточных конвейерах горнорудных предприятий. Система представляет собой автоматическое средство водяного пожаротушения дренчерного типа, подсоединяемое к шахтному противопожарному трубопроводу.

Система УЛТК используется для локализации и тушения пожаров в горных выработках угольных шахт и горнорудных предприятий, в том числе оборудованных ленточными конвейерами. При срабатывании система создает двухэшелонную водяную завесу по всему сечению выработки на длине 12 м и, охлаждая высокотемпературные продукты горения, препятствуют дальнейшему распространению пожара по выработке.

Основные технические данные отечественных систем водяного пожаротушения приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные технические данные установок (систем) для создания водяных завес

Наименование параметра	Тип установки (системы)							
	ВВР-1	УВЗ-2	АУВП- «ЮРЭК»	«Барьер»	УВПК- 1М	УВПК-Б1	УЛТК	УПТЛК
1. Величина площади сечения защищаемой выработки, м ²	4-9	4-9	54	54	54	54	36	90
2. Рабочее давление воды перед установкой (системой), МПа	0,6-1,5	0,6-1,5	0,4-2,0	0,4-2,0	0,14-2,0	0,35-2,0	0,6-2,0	0,35-2,4
3. Расход воды через установку (систему), м ³ /ч	45	до 80	54	54	44	44	44	79,2
4. Температура срабатывания установки (системы), °С	-	72	72±2	72±2	68±2	72±2	72±2	68±3
5. Диаметр капли распыленной воды, м	0,75-0,85	0,55-0,65	0,6-0,7	0,6-0,7	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1-0,3	0,9-1,2
6. Расчетная температура охлаждаемого газовойоздушного потока, °С								
- на входе в водяную завесу	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
- на выходе из водяной завесы	650	400	300	300	300	300	300	300

Известно, что эффективность водяной завесы для локализации пожара зависит от типа распыливающих устройств (далее – распылителей), создающих факел распыленной воды определенных размеров и структуры.

Параметрами, характеризующими факел орошения, являются расход подаваемой воды, размер капель воды, сечение факела, время полета капель.

Плотность факела водяной завесы зависит от типа распылителей [21]. Наибольшей равномерностью водонасыщения обладают факелы конусных распылителей. Чем меньше угол раскрытия факела, тем выше равномерность водонасыщения [22].

Конструктивные размеры таких распылителей и параметры образуемых факелов представлены в работах [21, 23]. Максимальный диаметр факела измеряли на пылевом стенде при скорости воздуха 1,3 м/с на расстоянии 0,5 м от сопла распылителей разных типоразмеров. Исследования проводили при давлениях 1 МПа и 1,5 МПа. Размеры факела оставались одинаковыми, уменьшались они лишь при давлении менее 0,5 МПа. Объясняется это тем, что с ростом давления уменьшается размер капель, а, следовательно, увеличивается их парусность.

На угольных шахтах наиболее распространенными являются центробежные и центробежно-струйные распылители [23], но встречаются и струйные распылители.

Важной характеристикой этих распылителей является дисперсность распыляемой воды.

Струйные распылители представляют собой насадки с цилиндрическими либо какой-то другой формы отверстиями. Струя, вылетающая из струйного распылителя, под действием перепада давления распадается на капли, образуя дисперсный факел с малым углом раскрытия.

Расчеты, проведенные в работе [24], показывают, что с ростом давления размер капель уменьшается, но, начиная с давления (6 – 8) МПа, темп этого снижения становится весьма малым. Так, для насадок Н-2,7 при размерах капель в 100 мкм необходимое давление составляет 10,5 МПа. Для насадок диаметром 0,8 мм необходимо давление 6,5 МПа, чтобы распыливать воду на капли размером 100 мкм.

И наоборот, при малых давлениях воды образуются капли весьма больших размеров.

Центробежные распылители имеют тангенциальные входные отверстия или закручивающее устройство, что придает воде вращательное движение. При подаче воды в центробежный распылитель в выходном сопловом канале образуется вихрь, обеспечивающий максимальный расход воды, а у выходной кромки распылителя водяная пленка [25].

За счет тангенциальных сил толщина пленки уменьшается и происходит ее дробление. Чем она тоньше, тем мельче капли, образующиеся при ее распаде.

Тангенциальная составляющая сил, действующих на струю, расходуется на дробление воды, а продольная – на обеспечение дальнобойности капель.

Согласно [24] размер капель при распыливании воды центробежными распылителями находится в прямой зависимости от диаметра выходного отверстия распылителя и степени его заполнения и в обратной - от угла раствора факела и расхода воды.

Однако даже факел с большой плотностью капель в периферийной части не обеспечивает равномерного распределения распыленной воды по сечению защищаемой горной выработки.

Принцип максимального расхода воды через центробежный распылитель есть следствие равенства поступательной скорости течения в сопле и скорости распространения волн на свободной поверхности воздушного вихря в поле центробежной силы.

В отличие от струйных распылителей вода, протекающая через центробежный распылитель, приобретает в нем момент количества движения относительно оси сопла.

Центробежные распылители имеют существенные недостатки: слабо заполненный факел, при увеличении расхода воды до 10,8 – 14,4 м³/ч и выше дисперсность капель в факеле резко снижается.

Центробежно-струйные распылители в отличие от других имеют два потока. Первому сообщается вращение, а второй подается в камеру смешивания через центральное отверстие в виде осевой струи.

При подаче воды в центробежно-струйный распылитель вращающийся поток передает часть энергии центральной струе и частично раскручивает ее, а сам притормаживается. Вследствие этого образуется единый поток, который распыляется с образованием факела в виде полного конуса.

Определяющим фактором для диаметра капель воды является входное давление и диаметр выходного отверстия распылителя, а также соотношение сечения тангенциальных каналов и центрального отверстия вкладыша.

Для локализации и тушения пожара также применяют специальные насадки.

Насадки дефлекторного типа разрушают воду до туманообразного состояния. Они сконструированы по принципу удара напорной струи о специальный отражатель.

К этому типу относят ствол-распылитель РС. Вода, проходя по кольцевой щели между неподвижно закрепленным дефлектором и корпусом, перемещающимся вдоль оси ствола, образует полный факел распыленной воды, угол конуса которого меняется от 0° до 160° в зависимости от расположения дефлектора. Дальность полета капель при угле раскрытия факела от 60° до 140° составляет 8 – 14 м (при входном давлении 0,4 МПа).

В распылителях дефлекторного типа ВС-2 сделаны радиальные прорези, благодаря которым центральная часть факела заполняется водой.

В распылителях РН-2 распыление потока воды происходит благодаря вращательному его движению и соударению струй в камере смешивания.

При использовании щелевых распылителей факел представляет собой плоский зонт. Дальность полета зависит от высоты расположения распылителя над почвой. Вследствие незначительной степени распыления воды, а также быстрой засоряемости проходной щели (при использовании шахтной воды) применение таких распылителей в горных выработках шахт не рекомендуется.

Восьмиобразные распылители, образующие плоский факел, относятся к распылителям ударного действия. К ним также относятся распылители системы Снигирева, которые имеют большие проходные отверстия.

К недостаткам таких распылителей относят узкий и длинный факел.

Существуют пневматические распылители, в которых распыление осуществляется при помощи сжатого воздуха. При таком распылении получается высокая степень измельчения воды, большой радиус действия обеспечивается при помощи потока свежего воздуха, выходящего из распылителя.

Недостаток таких распылителей в том, что для них необходима прокладка дополнительных трубопроводов для подвода сжатого воздуха.

Применяются и винтовые распылители. Работа этих распылителей состоит в том, что поток воды в насадке отсекается по периферии постепенно сужающимися винтовыми гранями, струи воды отбрасываются по плоскости винта и создают заполненный факел.

Таковыми распылителями оборудуются водоразбрызгиватели ВВР-1, находящиеся на оснащении ГВГСС, и установки УАК-2.

Распылители с ориентируемым факелом называются полидефлекторным. Они выполнены в виде сходящего конического лотка. В верхней части распылителя расположены дефлекторы с различными углами наклона по направлению движения водяной струи.

Работа их состоит в том, что поток воды в распылителе отсекается в верхней части по периферии постепенно суживающимися дефлекторами, вследствие этого струи воды отбрасываются вперед и вверх по плоскости дефлекторов, создавая заполненный факел распыленной воды. Эти распылители характеризуются большими проходными отверстиями.

Недостатком таких распылителей является то, что расположение в одной точке не создает оптимальных условий для тушения и локализации пожара.

Таким образом, анализ показал, что высокая эффективность действия водяной завесы обеспечивается использованием центробежно-струйных распылителей, которые в ограниченных условиях горных выработок создают равномерный по

сечению факел каплей требуемых размеров и обеспечивают максимальную дальность их полета, а тем самым время соприкосновения с нагретыми газами. Разработка и расчет параметров этих распылителей является важной составной частью настоящей диссертационной работы.

1.4 Анализ методов расчета параметров средств локализации подземных пожаров мелкораспыленной водой

Локализация и тушение пожаров в горных выработках является сложным технологическим процессом, основанным на оценке теплофизических параметров пожара, вентиляционного режима, параметров противопожарного трубопровода, и, на этой основе, выборе пожаротушащего оборудования и тактики его применения.

Наиболее доступным, дешевым и эффективным средством является распыленная вода, подаваемая в очаг пожара в виде распыленных струй.

Распыленные струи – это поток воды, состоящий из мелких капель. При подаче воды распыленными струями создаются наиболее благоприятные условия для ее испарения и тем самым повышения охлаждающего эффекта и разбавления горючей среды.

Локализация пожара в горных выработках играет решающую роль в их противопожарной защите. Для целей локализации пожара применяют водяные завесы, охлаждающие исходящий из очага пожара поток нагретых газов до безопасных температур.

Согласно [26-31] нормы водоснабжения на пожарные нужды колеблются в широком диапазоне. Так, нормы водоснабжения для устройства водяных завес колеблются от 0,014 до 0,022 м³/(с·м²), а общие нормы противопожарного водоснабжения от $13,8 \cdot 10^{-3}$ до $55,6 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Нормируемая интенсивность подачи распыленной воды на непосредственное тушение пожаров на 1 м² горячей поверхности также колеблется от $0,8 \cdot 10^{-4}$ до $3,4 \cdot 10^{-4}$ м³/(с·м²) [10].

Несмотря на то, что вода является традиционным и основным средством тушения пожаров, до сих пор не решены вопросы наиболее эффективной её подачи в зону горения, что приводит к низкому коэффициенту ее использования. Решение данной проблемы позволит снизить нормы запаса воды для средств пожаротушения.

В системах, использующих в качестве огнетушащего вещества воду, реализуются следующие механизмы тушения:

Охлаждение очага горения.

При попадании на разогретую поверхность происходит испарение воды - процесс, представляющий собой фазовый переход первого рода. Такие процессы являются наиболее энергоемкими, причем испарение воды имеет один из самых высоких показателей теплового эффекта парообразования (2260 кДж/кг; для сравнения тепловой эффект испарения твердого CO_2 составляет 573,6 кДж/кг). Таким образом, испарение воды при попадании ее в очаг горения является мощным охлаждающим фактором [31-36].

Изоляция очага горения.

При испарении объем воды возрастает в 1700 раз, поэтому очаг горения на некоторое время покрывается слоем газа, который химически является продуктом предельного окисления водорода (H_2O) и потому в общем случае не поддерживает горения. До тех пор, пока не произойдет размывание этого слоя в результате газообмена с окружающей средой, изоляционный механизм тушения будет работать.

Разбавление реагирующих продуктов.

Как известно, процесс горения является газофазным. Основными участниками реакции выступают кислород воздуха, продукты испарения горящего вещества и первичные продукты горения (газообразные продукты термодеструкции горящего вещества и неполного сгорания). Появление в газовой фазе негорючего компонента приводит к снижению концентрации всех продуктов реакции в системе и тем самым уменьшает скорость реакции горения. Снижение концентрации происходит благодаря перемешиванию газообразных компонентов за счет двух основных движущих сил: естественного броуновского движения молекул, стремящегося к

выравниванию концентрации компонентов во всем занимаемом объеме, и конвекционных потоков, имеющих направление, во-первых, от участков с большей температурой к участкам с меньшей температурой и, во-вторых, более нагретые (и, следовательно, менее плотные) слои газа устремляются вверх. При этом в освободившееся пространство устремляются более холодные потоки газа. Если они состоят в основном из негорючего газа (водяной пар), то концентрация реагентов будет постепенно уменьшаться до той величины, при которой дальнейшая реакция горения становится невозможной.

Прямой контакт водяных капель с горящим материалом и его охлаждение.

Многочисленные исследования, проводившиеся в различных странах мира и отображенные в большом количестве публикаций, показывают, что распыление воды до определенных размеров капель значительно повышает ее огнетушащую эффективность. Так, в [37-42] рассматриваются физико-химические процессы горения и локализации пожара. Показано, что вследствие распыления значительно сокращается расход воды и время локализации пожара.

Детальное изучение локализации и тушения различных веществ распыленной водой представлено в работах российских ученых [43-53]. В этих работах доказывается, что при горении конкретного вещества наибольшая эффективность локализации достигается в определенном интервале дисперсности капель воды. В работах [31, 54, 55] проведен анализ и систематизация исследований российских ученых в этом направлении.

Так как теплообмен, а соответственно и скорость теплосъема, зависит от величины поверхности контакта воды с нагретыми в процессе горения газами и поверхностью горящего материала, то очевидно, что увеличение удельной поверхности распыленной воды приводит к более эффективному теплообмену. Попытка установить разумные пределы варьирования диаметра капель для увеличения доли полностью испарившейся воды при пожаре предпринята в работах [56-60]. Повышению эффективности использования воды при локализации и тушении пожаров за счет снижения потерь посвящена работа [61]. В публикациях

[62, 63, 64] делается вывод, что охлаждение продуктов сгорания защищаемого помещения путем испарения водяных капель представляется перспективным механизмом локализации и тушения пожаров спринклерными системами. Основными объектами исследования в этих работах являются расход воды и размер капель.

В работе [65] проведены исследования тушения проливов дизельного топлива, при этом использовалась распыленная вода с диаметром капель $(100 \div 390) \cdot 10^{-6}$ м.

В работе [66] приведены данные исследований оптимальных размеров капель воды для тушения различных веществ, проводимых в исследовательском центре США.

В работе [67] показано, что тушение деревянных штабелей распыленной водой с диаметром капель $(10 \div 100) \cdot 10^{-6}$ м в 10÷20 раз эффективнее тушения сплошными струями.

В публикации [68] доказывается, что для локализации и тушения пожаров наиболее эффективно использование воды с диаметром капель $(40 \div 400) \cdot 10^{-6}$ м.

В работе [69] установлено, что для локализации развитого пожара десяти литров керосина достаточно всего 0,5 л воды с диаметром капель $(80 \div 200) \cdot 10^{-6}$ м.

Детальный обзор иностранных публикаций, посвященных использованию распыленной воды при локализации пожара, приведен в работах [70, 71].

Проведены эксперименты [72], в которых измерялось количество испарившейся и оставшейся неиспользованной (по причине утечки) воды в условиях, когда геометрия помещения, вентиляция и характеристики горючих веществ были схожи с теми, которые использовал Солзберг [73] (высота комнаты 2,44 м, площадь пола 11,1 м², площадь окна 1,69 м², пожарная нагрузка 22 кг/м³).

Эксперименты показали, что при скорости подачи водяной струи ниже 25 л/мин невозможно контролировать развитие пожара. Для потоков воды со скоростью подачи от 25 до 50 л/мин и средним диаметром капель от 0,2 до 0,4 мм объем воды, действительно испарившейся, приблизительно постоянен и равен 100 л, хотя общее количество требуемой воды может изменяться в значительных пределах.

В работах [71, 74] проведен анализ и сравнение результатов, полученных разными авторами, и сделан вывод, что наиболее оптимальной является дисперсность воды $(100 \div 150) \cdot 10^{-6}$ м.

Для получения капель требуемых размеров необходимо изучение законов распыления воды. Закономерности распыления, обусловленного воздействием аэродинамических сил на струю, рассмотрены в работах [75-79].

В работе [80] предложена математическая модель, описывающая динамику пожара в помещении при его тушении распыленной водой со средним диаметром капель $(100 \div 150) \cdot 10^{-6}$ м.

Описание технических средств, используемых для распыления воды, представлены в работах [43, 81, 82, 83].

Эффективность использования различных технических средств, используемых для распыления, представлены в работах [82, 84, 85, 86]. Требования к этим средствам представлены в работе [87].

В работе [88] используется математическая модель осесимметрического течения, в которой уравнение Навье-Стокса представлено в виде уравнения переноса завихренности, то есть в виде формулировки $\zeta - \psi$. Данное уравнение решается с использованием R – функций (RFM), что позволяет получить решение для осесимметричных каналов сложной формы.

Данный подход позволяет рассчитать и сконструировать распылитель на основе газоводяных струй тонкого распыла, что обеспечит экономичные и эффективные методы локализации и тушения.

В работе [89] представлена зависимость для определения параметров сопел, обеспечивающих кавитационный режим истечения воды. При возникновении кавитации в потоке воды происходит образование, рост и схлопывание кавитационных микрокаверн. При схлопывании происходит образование кумулятивных микроструй, обеспечивающее эффективное диспергирование воды.

Одним из механизмов, определяющих огнетушащую эффективность действия воды в диспергированном состоянии, является испарение мелких капель в нагретой среде.

Процессы испарения исследуются в работах [46, 90, 91, 92, 93, 94].

Особого внимания заслуживают исследования Максвелла и Ленгмюра [90].

Отметим, что нет единого подхода и к расчету параметров локализации. Большой диапазон нормируемых величин противопожарного водоснабжения является следствием того, что они устанавливались экспериментально для частных случаев, или из опыта использования водяных завес, и не имеют под собой должного аналитического обоснования.

Так, в работах [95, 96] автор предлагает рассчитывать расход воды в завесе, создаваемой в горной выработке Q_3 , м³/с, по зависимости

$$Q_3 = k S_B V_B^{1,3}, \quad (1.1)$$

где k – эмпирический коэффициент;

S_B – площадь поперечного сечения выработки, м²;

V_B – скорость вентиляционной струи в выработке, м/с.

Недостатком этой зависимости является то, что температура газов на входе в завесу и после нее принимается фиксированной (1200 °С и 600 °С, соответственно), а также не учитывается размер капель.

В работах [97, 98] решена задача определения расхода воды на образование завесы для снижения температуры нагретых газов, однако результаты решения отличаются сложностью и громоздкостью выражений, что исключает возможность их оперативного практического использования при локализации подземных пожаров силами ГВГСС. Кроме того, в расчете используются коэффициенты тепло- и массообмена, аналитическое определение которых отсутствует, а экспериментальная оценка адекватна лишь для некоторой ограниченной области изменения параметров.

В работе [95] исследована задача установления норм расхода воды завесой. Получена формула для определения температуры нагретых газов на выходе из зоны действия водяной завесы с учетом расхода воды и воздуха, подаваемых в эту зону. К

недостаткам этой работы следует отнести то, что температуру нагретых газов, поступающих в завесу, не определяли аналитически, а принимали постоянной и равной 1000 °С. Не учитывался также диаметр капель воды в завесе. По этим причинам получаемые нормы расхода воды на образование водяной завесы во многих случаях оказываются завышенными. В работах [97, 98] изучены физические основы тепло- и массообмена в водяной завесе, определена глубина факела водяной завесы, выполнен анализ работы винтовых и полидефлекторных распылителей при образовании завесы, получены расчетные значения для определения температуры нагретых газов и охлаждающей воды в завесе, а также парциального давления водяного пара. Применительно к винтовым и полидефлекторным распылителям предложена зависимость для определения глубины факела водяной завесы по дальности полета капель.

Однако в работе не учитываются фактическая пожарная нагрузка в аварийной горной выработке, а также поглощение тепла окружающими выработку горными породами.

Эффективность локализации подземных пожаров водяными завесами зависит от гидравлических характеристик противопожарного трубопровода.

В работе [99] решается задача обеспечения водой с требуемым расходом нескольких параллельно соединенных потребителей (пожарных стволов) при различных длинах и диаметрах применяемых водопроводов, запитываемых от насоса. Недостатком этого метода расчета является то, что в данной задаче не рассмотрены случаи, когда потребители имеют неодинаковые гидравлические сопротивления и различные геодезические отметки своего положения.

В работе [100] уточнен механизм теплообмена нагретых пожарных газов с мелкораспыленной водой, который состоит в изменении степени охлаждения потока в зависимости от дисперсности воды. При этом установлена эмпирическая зависимость количества испаряющейся воды в зависимости от диаметра капель и температуры газового потока, выходящего из зоны горения.

Разработанные нормы расхода воды на локализацию и тушение подземных пожаров в зависимости от дисперсности воды и температуры газового потока представлены в таблице 1.4.

Это позволило обосновать нормы расхода воды на локализацию и тушение подземного пожара в зависимости от пожарной нагрузки горной выработки, скорости распространения пожара и гидравлических параметров оборудования, с помощью которого создается завеса.

Таблица 1.4 – Расход воды $Q_{ж}$, м³/ч, на 1 м³/с расхода нагретого газа

Температура на входе в завесу T , К	Диаметр капли воды, d , мм					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1473	<u>0,938*</u> 1,630	<u>0,774</u> 1,930	<u>0,562</u> 2,550	<u>0,358</u> 3,660	<u>0,201</u> 5,530	<u>0,099</u> 8,260
1273	<u>0,923</u> 1,320	<u>0,735</u> 1,620	<u>0,500</u> 2,240	<u>0,292</u> 3,420	<u>0,146</u> 5,390	<u>0,063</u> 8,050
1073	<u>0,908</u> 1,006	<u>0,680</u> 1,300	<u>0,420</u> 1,940	<u>0,215</u> 3,180	<u>0,090</u> 5,190	<u>0,031</u> 7,410
873	<u>0,880</u> 0,690	<u>0,600</u> 0,970	<u>0,315</u> 1,610	<u>0,128</u> 3,900	<u>0,041</u> 4,630	<u>0,010</u> 5,850
673	<u>0,823</u> 0,370	<u>0,463</u> 0,600	<u>0,177</u> 1,200	<u>0,046</u> 2,230	<u>0,008</u> 2,970	<u>0,001</u> 3,170
*) В числителе - значение χ - доля испарившейся воды в завесе; в знаменателе – значение $Q_{ж}$.						

Однако отсутствуют ответы на вопросы, каким образом подать необходимое количество воды в выработку, чтобы доля испарившейся воды отвечала нормативному значению, какой должна быть глубина завесы и распределение капель воды по сечению выработки, чтобы температура газового потока была снижена до безопасной величины.

Таким образом, единая научно обоснованная методика расчета параметров локализации подземных пожаров распыленной водой в настоящее время отсутствует и требует обоснования и детальной разработки.

Обобщая материал первого раздела, сформулируем цель настоящей работы и ее задачи.

1.5 Цель и задачи исследований

Анализ рассматриваемой проблемы показал, что современное состояние противопожарной защиты угольных шахт неадекватно их пожарной опасности.

Наиболее опасными в аварийном отношении являются:

- выработки, оборудованные ленточными конвейерами;
- тупиковые выработки большой протяженности;
- сопряжения лав с вентиляционными и откаточными штреками.

Одной из ключевых проблем при ликвидации пожаров является их локализация. Для ее обеспечения необходимо значительное количество воды. Зачастую горноспасателям и инженерно-техническим работникам шахты приходится прилагать серьезные усилия для создания на аварийном участке необходимого напора и расхода воды в противопожарном трубопроводе.

В результате локализовать пожар в горных выработках и, особенно, в оборудованных ленточными конвейерами, не всегда удается, он развивается и приобретает затянувшийся, осложнившийся характер. Это приводит к значительным экономическим и социальным потерям.

Эффективность локализации пожаров повышается при использовании мелкораспыленной воды. Однако существующие методики расчета не позволяют определить адекватные обстановке на аварийном участке параметры завесы.

Охлаждающая способность распыленной воды и закономерности баллистики образующих ее капель в горных выработках недостаточно исследованы. Отсутствуют нормативные величины концентрации мелкораспыленной воды для локализации пожаров в горных выработках.

Цель работы – обоснование параметров эффективной локализации подземных пожаров завесами с мелкораспыленной водой на базе установленных зависимостей изменения температуры пожарных газов в процессе их взаимодействия с каплями воды при тепломассообмене.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ методов исследования теплообменных процессов при пожарах в горных выработках;

- провести исследования, установить закономерности теплообменного процесса между потоком нагретых пожарных газов и мелкораспыленной водой и определить параметры водяной завесы для снижения температуры газов до безопасной величины;

- провести теоретические и экспериментальные исследования гидравлических процессов движения мелкораспыленной воды в горных выработках и обосновать выбор технического решения для получения требуемой дисперсности воды при нормируемом давлении в противопожарном трубопроводе;

- разработать математическую модель движения воды в распылителе и обосновать его параметры для достижения требуемых размеров и дисперсности водяной завесы;

- выбрать рациональное размещение распылителей в защищаемой горной выработке и разработать метод расчета локализации пожаров на подземных объектах различного назначения.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

2.1 Теплообмен нагретых пожарных газов и мелкораспыленной воды в горных выработках

Практикой борьбы с подземными пожарами доказано, что при разработке тактики локализации пожара, а также выборе средств тушения необходимо знать скорость передвижения зоны горения вдоль выработки, которая зависит от степени выгорания воздуха в зоне горения.

В работе [101] получены соотношения для оценки скорости продвижения зоны горения. Их применение дает возможность провести сопоставления скорости распространения пожара (зоны горения) со скоростью его тушения. Оказалось, что в большинстве случаев выполнение условия

$$V_{\text{туш}} > V_{\text{п}}, \quad (2.1)$$

где $V_{\text{туш}}$ – скорость тушения пожара, м/с;

$V_{\text{п}}$ – скорость распространения пожара по выработке, м/с,

невозможно, так как в проветриваемых выработках скорость тушения пожара в 3 – 4 раза ниже скорости его распространения. В связи с этим актуальной становится постановка вопроса о разработке тактических приемов снижения скорости распространения пожара по выработке.

Одним из таких приемов является локализация и удержание пожара в некотором объеме выработки путем создания впереди зоны горения водяной завесы в период времени активного тушения. При этом установки локализации пожаров приобретают решающую роль в противопожарной защите шахт.

При взаимодействии капель мелкораспыленной воды с нагретым в зоне пожара газовым потоком происходит их испарение, что приводит к снижению температуры газа при выходе его из завесы.

Процесс испарения капель зависит от соотношения между парциальным давлением пара $P_{\text{п}}$ в пространстве водяной завесы и парциальным давлением пара $P_{\text{к}}$ у поверхности капель. При $P_{\text{к}} > P_{\text{п}}$ происходит испарение капель. При $P_{\text{к}} = P_{\text{п}}$ наступает процесс равновесия между испарением и конденсацией, то есть в единицу времени в единице объема завесы испаряется столько же воды, сколько ее и конденсируется. Исходя из этого, оценим максимальное влагосодержание во влажном газовом потоке, при котором температура в газовом потоке при выходе из водяной завесы снизится до безопасной величины.

Барометрическое давление парогазовой смеси $P_{\text{б}}$ в зоне водяной завесы равно сумме парциальных давлений сухого газа $P_{\text{с}}$ и водяных паров $P_{\text{п}}$

$$P_{\text{б}} = P_{\text{с}} + P_{\text{п}}. \quad (2.2)$$

Уравнение состояния влажного газового потока можно представить аналитической зависимостью [102]

$$P_{\text{б}} V_{\text{пт}} = m_{\text{в}} R_{\text{в}} T_{\text{с}}, \quad (2.3)$$

где $P_{\text{б}}$ – барометрическое давление парогазовой смеси, Па;

$V_{\text{пт}}$ – объем парогазовой смеси, м³;

$m_{\text{в}} = m_{\text{с}} + m_{\text{п}}$ – масса влажного газа, его сухой части и пара, соответственно, кг;

$T_{\text{с}}$ – абсолютная температура смеси, К;

$R_{\text{в}}$ – газовая постоянная парогазовой смеси, Дж/(кг·К);

$$R_{\text{в}} = \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{в}}} R_{\text{с}} + \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}} R_{\text{п}}, \quad (2.4)$$

где R_c , R_π – газовые постоянные сухого газа и водяного пара, соответственно, Дж/(кг·К).

Влагосодержание газового потока в водяной завесе w , г/кг

$$w = \frac{m_\pi}{1000m_c}. \quad (2.5)$$

В зависимости от влагосодержания w парциальное давление водяного пара [102] определяется по формуле

$$P_\pi = P_6 \frac{w}{622+w}, \quad (2.6)$$

откуда влагосодержание равно

$$w = 622 \frac{P_\pi}{P_6 - P_\pi}. \quad (2.7)$$

Максимальное влагосодержание будет иметь место при парциальном давлении пара, равном давлению насыщенного пара P_n , то есть $P_\pi = P_n$, тогда влагосодержание газового потока составит

$$w_n = 622 \frac{P_n}{P_6 - P_n}. \quad (2.8)$$

Плотность сухого газового потока ρ_c , кг/м³

$$\rho_c = \frac{m_c}{V} = \frac{P_c}{R_c T_c} = \frac{P_6 - P_\pi}{R_c T_c}. \quad (2.9)$$

Плотность водяного пара $\rho_{вп}$, кг/м³

$$\rho_{вп} = \frac{m_\pi}{V_{\pi r}} = \frac{P_\pi}{R_\pi T_c}. \quad (2.10)$$

Плотность влажного газового потока $\rho_{вгп}$, кг/м³

$$\rho_{вгп} = \rho_c + \rho_{вп} = \frac{P_6 - P_{п}}{R_c T_c} + \frac{P_{п}}{R_{п} T_c}. \quad (2.11)$$

Можно принять, что влагосодержание газового потока (шахтного воздуха) перед водяной завесой равно нулю, т.е. $w = 0$.

Энтальпия I_c , Дж/кг, одного килограмма газового потока перед водяной завесой

$$I_c = c_{ргп} T_{гк}, \quad (2.12)$$

где $c_{ргп}$ – удельная теплоемкость газового потока, Дж/(кг·К);

$T_{гк}$ – температура газового потока перед водяной завесой, К [10].

В водяной завесе за счет испарения распыленной воды температуру газового потока необходимо уменьшить до значения ниже температуры воспламенения горючих материалов в выработке $T_{г} < T_{восп}$.

При этом энтальпия газового потока должна быть уменьшена до величины, соответствующей безопасной температуре газового потока $T_{г} = T_{восп}$, то есть

$$I_c = c_{ргп} (T_{гк} - T_{восп}), \quad (2.13)$$

где $T_{восп}$ – температура воспламенения горючих материалов в выработке, К.

Считаем, что максимальное уменьшение энтальпии газового потока возможно при подаче распыленной воды до насыщения его водяным паром до максимального влагосодержания $w_{н}$.

При этом энтальпия образовавшихся водяных паров $I_{п}$, Дж/(кг·К), составит

$$I_{п} = (r + c_{рвп} T_{восп}) \frac{w_{н}}{1000} \text{ или } I_{п} = (2502,7 + 1,84 T_{восп}) \frac{w_{н}}{1000}, \quad (2.14)$$

где r – удельная теплота парообразования воды, $r = 2502,7$ кДж/кг;

$c_{рвп}$ – удельная теплоемкость водяного пара, $c_{рвп} = 1,84$ кДж/(кг·К) [102].

При максимальном влагосодержании, определяемом по (2.8), энтальпия образовавшегося в газовом потоке в зоне водяной завесы водяного пара с его перегревом до температуры $T_{восп}$, К, определяется по зависимости

$$I_{п} = (2502,7 + 1,84T_{восп}) \frac{0,622P_{н}}{P_{б}-P_{н}}. \quad (2.15)$$

Приравняв (2.13) и (2.14), получим

$$c_{ргп}(T_{гк} - T_{восп}) = (r + c_{рвп}T_{восп}) \frac{w_{н}}{1000}, \quad (2.16)$$

откуда необходимое для охлаждения одного килограмма газового потока влагосодержание

$$w_{н} = \frac{1000c_{ргп}(T_{гк}-T_{восп})}{r+c_{рвп}T_{восп}}. \quad (2.17)$$

Так, при $c_{ргп} = 1,0117$ кДж/(кг·К), $T_{гк} = 1073$ К, $T_{восп} = 473$ К, $w_{н} = 211,45$ г/кг.

Следовательно, за счет испарения распыленной воды в водяной завесе, обеспечивающего влагосодержание $w_{н} = 211,45$ г/кг, газовый поток охладится до $T_{г} = T_{восп}$.

При температуре газового потока $T_{восп} = 473$ К удельный объем перегретого водяного пара $V''=2,172$ м³/кг, тогда его плотность составит $\rho_{вп} = 0,460$ кг/м³, при этой температуре плотность сухого газового потока $\rho_{сгп} = 0,746$ кг/м³.

При $w_{н} = 211,45$ г/кг парциальное давление водяного пара в завесе будет $P_{п} = 0,0254$ МПа.

В работе [103] приведены результаты исследований, учитывающие тот факт, что часть капель воды в завесе попадает на стенки и почву выработки, не успевая

испариться. Установлено, что доля испарившейся в завесе воды выражается зависимостью

$$\chi = e^{-\frac{ad_0^2}{T_{ГК}}}, \quad (2.18)$$

где χ – доля испарившейся воды в завесе, $\chi < 1$;

d_0 – средний начальный диаметр капель воды в завесе, мм;

a – эмпирический коэффициент, $a = 7695 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мм}^2$.

Тогда с учетом (2.17) для снижения температуры газового потока до безопасной величины необходимое влагосодержание на один килограмм газового потока

$$w_H = \frac{1000c_{ггп}(T_{ГК} - T_{восп})}{\chi(r + c_{рвп}T_{восп})}.$$

Массовый расход газового потока $M_{Г}$, кг/с

$$M_{Г} = V_{В}S_{В}\rho_{ГП}, \quad (2.19)$$

где $V_{В}$ – скорость газового потока в выработке, м/с;

$S_{В}$ – площадь сечения в выработке, м²;

$\rho_{ГП}$ – плотность газового потока, кг/м³.

Для охлаждения газового потока с расходом $M_{Г}$ потребуется ввести в водяную завесу распыленную воду с массовым расходом

$$M_{В} = \frac{M_{Г}w_H}{1000\chi} = \frac{V_{В}S_{В}\rho_{ГП}c_{ггп}(T_{ГК} - T_{восп})}{\chi(r + c_{рвп}T_{восп})}, \quad (2.20)$$

где $M_{В}$ – массовый расход распыленной воды, подаваемой в завесу, кг/с.

Разделив (2.20) на объемный расход газового потока, равный $V_B S_B$, м³/с, получим удельный массовый расход распыленной воды

$$M_{\text{бу}} = \frac{\rho_{\text{гп}} c_{\text{ргп}} (T_{\text{гк}} - T_{\text{восп}})}{\chi (r + c_{\text{рвп}} T_{\text{восп}})}, \quad (2.21)$$

где $M_{\text{бу}}$ – удельный массовый расход распыленной воды 1 кг/с на 1 м³/с газового потока.

Разделив (2.21) на плотность воды ρ_v и умножив на 3600, получим удельный объемный расход воды $M_{\text{вуо}}$, м³/ч, на охлаждение 1 м³/с газового потока

$$M_{\text{вуо}} = \frac{3600 c_{\text{ргп}} (T_{\text{гк}} - T_{\text{восп}})}{\rho_v \chi (r + c_{\text{рвп}} T_{\text{восп}})}. \quad (2.22)$$

При $c_{\text{ргп}} = 1,009$ кДж/(кг·К), $T_{\text{гк}} = 1073$ К, $T_{\text{восп}} = 473$ К, $\rho_v = 1000$ кг/м³, $\chi = 0,42$ (при $d_{\text{ср}} = 0,3$ мм), $r = 2502,7$ кДж/кг, $c_{\text{рвп}} = 1,84$ кДж/(кг·К) по (2.22) $M_{\text{вуо}} = 1,81$ м³/ч на 1 м³/с газового потока.

Зависимость (2.22) определяет максимальный удельный объемный расход распыленной воды, которая при испарении за счет отбора теплоты от газового потока снижает его температуру до безопасной величины $T_{\text{г}} \leq T_{\text{восп}}$. Полнота описания процесса связана с определением влияния на него испарения воды, качества ее распыливания, а также физических параметров воды и ее пара, от чего зависит длина водяной завесы в горной выработке, то есть расстояние от точки (сечения) впрыскивания в нагретый газовый поток распыленной воды до точки (сечения), где она полностью испаряется, пар перегревается, охлаждая нагретый газ.

Согласно [104] диаметр капли воды в завесе в процессе испарения уменьшается по зависимости

$$d^2 = d_0^2 - 2k_{\text{исп}} \tau, \quad (2.23)$$

где d – диаметр капли воды, м;

τ – время полета капли, с;

$k_{\text{исп}}$ – коэффициент испарения, м²/с.

При полном испарении капли $d = 0$, тогда в соответствии с зависимостью (2.23) время полного испарения

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{d_0^2}{2k_{\text{исп}}} . \quad (2.24)$$

Коэффициент испарения согласно [105] выражается формулой

$$k_{\text{исп}} = \frac{2Nu}{\rho_v} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{c_{\text{рвп}}} \ln \frac{\frac{r}{c_{\text{рвп}}} + (T_{\text{гк}} - T_{\text{кип}})}{r / c_{\text{рвп}}} , \quad (2.25)$$

где Nu – критерий Нуссельта, здесь $Nu \approx 2$ [105];

λ_Γ – коэффициент теплопроводности паро-газового потока, Вт/(м·К);

$T_{\text{кип}}$ – температура кипения воды при нормальном давлении, К.

Подставив в (2.24) выражение (2.25), для оценки времени испарения подаваемой в водяную завесу распыленной воды получим соотношение

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{d_0^2 \rho_v c_{\text{рвп}}}{2Nu \lambda_\Gamma \ln \frac{\frac{r}{c_{\text{рвп}}} + T_{\text{гк}} - T_{\text{кип}}}{\frac{r}{c_{\text{рвп}}}}} . \quad (2.26)$$

Для капли воды, испарившейся в завесе под действием теплоты, отбираемой от нагретых газов, окружающей каплю средой является смесь нагретого воздуха с водяным паром. Поэтому коэффициент теплопроводности λ_Γ можно представить как среднюю величину коэффициентов для воздуха λ_v и пара λ_Π , то есть

$$\lambda_\Gamma = \frac{\lambda_v + \lambda_\Pi}{2} . \quad (2.27)$$

Известно [105], что при температурах воздуха от 673 К до 1273 К, $\lambda_{\text{в}}=0,063 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а для водяного пара $\lambda_{\text{п}}=0,094 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Тогда $\lambda_{\text{г}}$ будет равно

$$\lambda_{\text{г}} = 0,078 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}). \quad (2.28)$$

Учитывая, что значения параметров $\rho_{\text{в}}, c_{\text{рвп}}, r, T_{\text{кип}}, \lambda_{\text{г}}$ в процессе снижения температуры газового потока меняются незначительно, при расчете времени испарения $\tau_{\text{исп}}$ можно принять их постоянными. При этом время испарения будет определяться в основном значением начального диаметра капли d_0 и температурой газового потока при входе в водяную завесу.

Тогда выражение (2.26) в численном виде будет

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{5,89 \cdot 10^6 d_0^2}{\ln[1 + 0,73 \cdot 10^{-3} (T_{\text{гк}} - 373)]}. \quad (2.29)$$

Время испарения капель воды в завесе при указанных условиях в зависимости от среднего начального диаметра капель d_0 и температуры $T_{\text{гк}}$ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Время испарения капель $\tau_{\text{исп}}$, с

Температура на входе в завесу $T_{\text{гк}}$, К	Средний начальный диаметр капли воды в завесе d_0 , мм					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1273	0,116	0,464	1,044	1,856	2,900	4,176
1073	0,128	0,512	1,152	2,048	3,200	4,608
873	0,189	0,756	1,708	3,024	4,725	6,804
673	0,297	1,118	2,673	4,752	7,425	10,692

Выразим d_0^2 из соотношения (2.18). Получим

$$d_0^2 = \frac{T_{гк} \ln \chi^{-1}}{a}. \quad (2.30)$$

Подставив (2.30) в (2.26), для оценки времени испарения воды $\tau_{исп}$, получим соотношение

$$\tau_{исп} = \frac{T_{гк} \ln \chi^{-1} \rho_v c_{рвп}}{2a Nu \lambda_r \ln \frac{\frac{r}{c_{рвп}} + T_{гк} - T_{кип}}{\frac{r}{c_{рвп}}}}. \quad (2.31)$$

Подставляя числовые значения параметров, получаем

$$\tau_{исп} = \frac{0,0076 T_{гк} \ln \chi^{-1}}{\ln[1 + 0,73 \cdot 10^{-3} (T_{гк} - 373)]}. \quad (2.32)$$

В формуле (2.32) числовой коэффициент 0,0076 имеет размерность с/К.

Температура газового потока T_r , К, при выходе его из зоны орошения определяется по формуле

$$T_r = T_{гк} - \frac{3q_p n_p \tau_{исп} \chi \rho_v r}{SL_3 \rho_{гп} c_{ргп}}, \quad (2.33)$$

где q_p – расход воды через один распылитель, м³/с;

n_p – количество распылителей в зоне орошения, шт.;

L_3 – глубина водяной завесы, м.

В результате проведенного анализа и исследования получены соотношения для оценки необходимого количества воды, подача которой обеспечивает снижение температуры потока пожарных газов до безопасного предела.

Получено соотношение для оценки времени испарения капли распыленной воды в зависимости от ее размеров и температуры газового потока, а также комплексного коэффициента теплопроводности паро-газовой смеси, окружающей каплю.

Для определения параметров водяной завесы, обоснования рационального размещения распылителей и выработке требований к распылителям возникает необходимость исследования полета испаряющихся капель в ограниченном поверхностью горной выработки пространстве.

2.2 Баллистика капель мелкораспыленной воды в вентиляционном потоке горной выработки

Для рациональной компоновки распылителей, обеспечивающей наиболее эффективное использование подаваемой воды на локализацию пожара в проветриваемой горной выработке, необходимо исследовать полет испаряющейся капли в ограниченном трехмерном пространстве.

Эта часть исследования выполнена методами математического моделирования.

При построении математической модели движения испаряющейся капли в нагретом газовом потоке приняты следующие допущения: газовый поток движется с постоянной скоростью $\vec{V}_B$, направление которой совпадает с направлением составляющей скорости вылета капли из сопла распылителя вдоль оси OY (рисунок 2.1) выработки

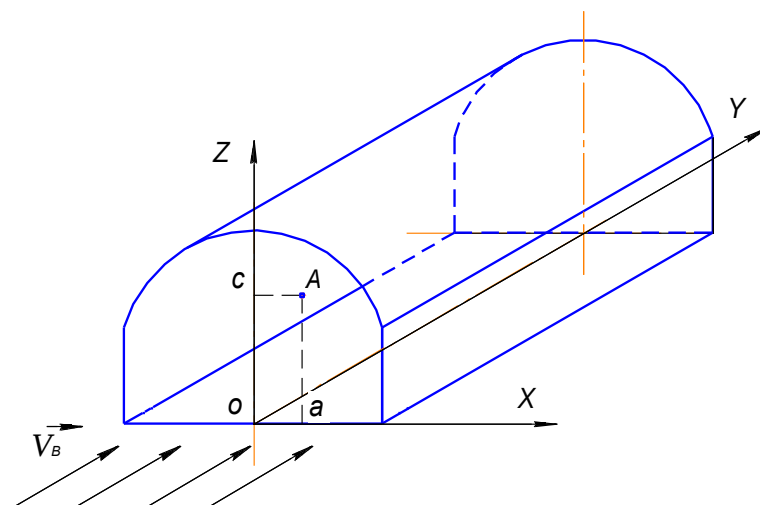


Рисунок 2.1 – Схема расположения распылителя в поперечном сечении горной выработки

Считаем, что сила сопротивления движению капли пропорциональна скорости обтекания ее потоком газа, а радиус капли с момента выхода на траекторию полета уменьшается во времени.

В результате изучения процессов испарения капель [106, 107] установлено, что площадь поверхности капли уменьшается во времени практически по линейному закону. Исходя из линейной зависимости S (площадь поверхности капли, которую с большой степенью точности можно считать сферой) от времени τ функциональную зависимость текущего радиуса капли во времени $r(\tau)$ представим в виде закона Срезневского [108]

$$r(\tau) = r_0 \sqrt{1 - \gamma \tau_{\text{п}}}, \quad (2.33)$$

где $r(\tau)$ – радиус капли в момент времени τ , м;

$\tau_{\text{п}}$ – время полета, с;

r_0 – начальный радиус капли в момент ее вылета, т.е. при $\tau=0$, м;

γ – коэффициент, характеризующий скорость испарения капли, с^{-1} , $\gamma = \frac{2k_{\text{исп}}}{d_0^2}$.

Считаем, что капля, вылетающая под углом β_k (β_k меняется в интервале $[-\beta; \beta]$, где β – угол раскрытия факела, град) к горизонту, имеет начальную скорость $\overline{V}_0$. Поскольку в данном разделе рассматриваются центробежно-струйные распылители, то в момент распада воды на капли они имеют составляющие скорости в виде: тангенциальной $U_{c\varphi}$, м/с, обусловленной закручиванием воды в камере смешивания распылителя, и поступательной U_{cx} , м/с. Тогда модуль вектора начальной скорости $|V_0|$ вычисляется из соотношения

$$|V_0| = \sqrt{U_{c\varphi}^2 + U_{cx}^2}. \quad (2.34)$$

Составляющие скорости $U_{сф}$, $U_{сх}$ и начальный радиус капли r_0 обуславливаются геометрическими параметрами и конструктивными особенностями распылителя, а также гидравлическими характеристиками потока воды в противопожарном трубопроводе.

При решении задачи о полете испаряющейся капли принимаем параметры $\vec{V}_0$, r_0 , β известными величинами.

Для вывода системы дифференциальных уравнений движения испаряющейся капли воспользуемся законом об изменении количества движения [108]

$$\frac{dm\vec{V}}{d\tau} = \vec{F}, \quad (2.35)$$

где m – масса испаряющейся капли, кг;

$\vec{V}$ – вектор скорость центра массы капли в момент времени τ , м/с;

$\vec{F}$ – результирующая сила, действующая на каплю, Н.

При полете в газовом потоке капля испытывает аэродинамическое сопротивление, сила которого равна $\vec{F}_1$ и направлена против движения капли. Считаем, что модуль силы $|\vec{F}_1|$ является степенной функцией скорости $|\vec{V}|$ обтекания капли газом, т.е.

$$F_1 = c_\omega S_k V^{2\omega+1}, \quad (2.36)$$

где ω – показатель степени;

c_ω – коэффициент аэродинамического сопротивления;

S_k – площадь поперечного сечения капли, м².

Расположим систему координат как показано на рисунке 2.1.

Вначале запишем систему дифференциальных уравнений в локальной системе координат. Начало основной системы координат путем параллельного переноса поместим в точку, где расположен распылитель (рисунок 2.1 точка А).

Введем в рассмотрение три функции $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$, совокупность которых определяет местоположение центра массы капли в пространстве $OXYZ$ в каждый момент времени.

В проекциях на оси координат имеем

$$V_x = \dot{x}(\tau), \quad V_y = \dot{y}(\tau), \quad V_z = \dot{z}(\tau), \quad (2.37)$$

где V_x , V_y , V_z – проекции скорости капли на координатные оси, м/с;

$\dot{x}(\tau)$, $\dot{y}(\tau)$, $\dot{z}(\tau)$ – производные по времени соответствующих координат центра массы капли, м/с.

Проекции силы аэродинамического сопротивления $\overline{F}_1$ с учетом (2.36) запишутся в виде

$$\begin{cases} F_{1x} = -c_\omega S_K \dot{x}(\tau) [\dot{x}^2(\tau) + (\dot{y}(\tau) - V_B)^2 + \dot{z}^2(\tau)]^\omega, \\ F_{1y} = -c_\omega S_K (\dot{y}(\tau) - V_B) [\dot{x}^2(\tau) + (\dot{y} - V_B)^2 + \dot{z}^2(\tau)]^\omega, \\ F_{1z} = -c_\omega S_K \dot{z}(\tau) [\dot{x}^2(\tau) + (\dot{y} - V_B)^2 + \dot{z}^2(\tau)]^\omega, \end{cases} \quad (2.38)$$

где V_B – модуль скорости нагретого газового потока, м/с.

Считаем, что движение газа совпадает по направлению с составляющей скорости капли $V_y = \dot{y}(\tau)$. Компоненты силы $\overline{F}_1$ в выражении (2.38) взяты с противоположным знаком, так как действие ее направлено против движения капли.

Учитывая (2.38), проекции результирующей силы F на оси локальной системы координат имеют вид

$$F_x = F_{1x}; \quad F_y = F_{1y}; \quad F_z = F_{1z} - mg, \quad (2.39)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Тогда векторное уравнение (2.35) в локальной системе координат преобразуется в систему дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} m\ddot{x}(\tau) + \frac{dm}{d\tau}\dot{x}(\tau) = -c_\omega S_K \dot{x}(\tau) [\dot{x}^2(\tau) + (\dot{y}(\tau) - V_B)^2 + \dot{z}^2(\tau)]^\omega, \\ m\dot{y}(\tau) + \frac{dm}{d\tau}(\dot{y}(\tau) + V_B) = -c_\omega S_K (\dot{y}(\tau) - V_B) [\dot{x}^2(\tau) + (\dot{y} - V_B)^2 + \dot{z}^2(\tau)]^\omega, \\ m\ddot{z}(\tau) + \frac{dm}{d\tau}\dot{z}(\tau) = -c_\omega S_K \dot{z}(\tau) [\dot{x}^2(\tau) + (\dot{y} - V_B)^2 + \dot{z}^2(\tau)]^\omega - mg. \end{cases} \quad (2.40)$$

Ранее принято, что капля имеет форму шара радиуса $r(\tau)$, тогда ее масса m с учетом соотношения (2.33) может быть записана в виде

$$m(\tau) = \frac{4}{3}\pi\rho_B r_o^3 (1 - \gamma\tau)^{3/2}. \quad (2.41)$$

Найдем выражение для производной по времени выражения (2.41). Имеем

$$\frac{dm}{d\tau} = 2\pi\rho_B r_o^3 (1 - \gamma\tau)^{1/2}(-\gamma) = -2\gamma\pi\rho_B r_o^3 (1 - \gamma\tau)^{1/2}. \quad (2.42)$$

Площадь поперечного сечения капли в каждый момент времени равна

$$S_K = \pi r^2(\tau) = \pi r_o^2 (1 - \gamma\tau). \quad (2.43)$$

В дальнейшем будем считать, что при полете капля испытывает аэродинамическое сопротивление только в направлении оси OY , сила которого пропорциональна квадрату скорости обтекания ее газом, т.е. $\omega=0,5$. Тогда после подстановки соотношения (2.42) в систему дифференциальных уравнений (2.40) и ряда элементарных преобразований получим систему уравнений

$$\begin{cases} \ddot{x}(\tau) - \frac{3\gamma}{2} \frac{1}{(1-\gamma\tau)} \dot{x}(\tau) = 0, \\ \ddot{y}(\tau) - \frac{3\gamma}{2} \frac{1}{(1-\gamma\tau)} (\dot{y}(\tau) + V_B) = -\frac{3C_\omega}{4r_o\rho_B} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma\tau}} (\dot{y}(\tau) - V_B)^2, \\ \ddot{z}(\tau) - \frac{3\gamma}{2} \frac{1}{(1-\gamma\tau)} \dot{z}(\tau) = -g. \end{cases} \quad (2.44)$$

Для получения единственного решения системы (2.44) необходимо сформулировать начальные условия. В локальной системе координат (на рисунке 2.1 точка А) в начальный момент времени величины $x(\tau), y(\tau), z(\tau)$ будут равны нулю

$$x(0) = y(0) = z(0) = 0. \quad (2.45)$$

Считаем, что капля вылетает с начальной скоростью $\overline{V}_0$ под углом β_k относительно горизонта. Если горная выработка горизонтальная, то угол β_k совпадает с углом вылета капли относительно протяженности горной выработки. Если горная выработка наклонная с углом наклона к горизонту равному φ , то угол наклона начального вылета капли относительно протяженности выработки необходимо выбирать в виде

$$\beta_* = \beta_k - \varphi. \quad (2.46)$$

В дальнейшем будем считать, что угол $\varphi=0$, то есть горная выработка – горизонтальная. Учет угла наклона φ не представляет трудности. Для этого достаточно в построенное решение вместо угла вылета капли β_k подставить выражение (2.46), где под β_* будем понимать угол вылета капли относительно протяженности горной выработки.

Начальные условия для проекций скорости полета капли в момент времени $\tau = 0$ будут иметь вид

$$\begin{cases} V_x(0) = \dot{x}(0) = |\overline{V}_0| \cos(n, x), \\ V_y(0) = \dot{y}(0) = |\overline{V}_0| \cos(n, y), \\ V_z(0) = \dot{z}(0) = |\overline{V}_0| \cos(n, z), \end{cases} \quad (2.47)$$

где $\cos(n, x)$, $\cos(n, y)$, $\cos(n, z)$ – направляющие косинусы единичного вектора, совпадающего по направлению с вектором скорости капли в начальный момент времени $\overline{V}_0$, для которых справедливо следующее соотношение

$$\cos^2(nx) + \cos^2(ny) + \cos^2(nz) = 1. \quad (2.48)$$

Система уравнений (2.44) с начальными условиями (2.45), (2.47) представляет собой задачу Коши, решение которой определяет координаты центра массы капли в каждый момент времени τ , то есть описывает траекторию полета испаряющейся капли.

После интегрирования системы (2.44) с начальными условиями (2.47) получим первые интегралы, характеризующие скорость полета испаряющейся капли в любой момент времени τ , в виде

$$\begin{cases} V_x = \dot{x}(\tau) = |\overline{V}_0| \cos(n, x) \tau^{*-3}, \\ V_y = \dot{y}(\tau) = \frac{3V_B}{K_\omega^3} \frac{[(1+K_\omega \tau^*)^2 + 1]}{\tau^{*3}} + \frac{C_0 e^{K_\omega \tau^*}}{\tau^{*3}} + 1, \\ V_z = \dot{z}(\tau) = \frac{2g}{5\gamma} \tau^{*2} + \left(|\overline{V}_0| \cos(n, z) - \frac{2g}{5\gamma} \right) \tau^{*-3}, \end{cases} \quad (2.49)$$

где

$$\begin{aligned} \tau^* &= \sqrt{1 - \gamma\tau}, \\ C_0 &= e^{-K_\omega} \left\{ |\overline{V}_0| \cos \theta - V_B - \frac{3V_B}{K_\omega^3} [(1 - K_\omega)^2 + 1] \right\}, \\ K_\omega &= \frac{3C_\omega}{2r_0 \gamma \rho_B}. \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений (2.49) относительно новой переменной τ^* запишется в виде

$$\begin{cases} \dot{x}(\tau^*) = -\frac{2}{\gamma} |\overline{V}_0| \cos(nx) \tau^{*-2}, \\ \dot{y}(\tau^*) = -\frac{6V_B}{\gamma K_\omega^3} \frac{(1+K_\omega \tau^*)^2 + 1}{\tau^{*2}} - \frac{2C_0}{\gamma} \frac{e^{K_\omega \tau^*}}{\tau^{*2}} - \frac{2V_B}{\gamma} \tau^*, \\ \dot{z}(\tau^*) = -\frac{4g}{5\gamma^2} \tau^{*3} - \frac{2}{\gamma} (|\overline{V}_0| \cos(nz) - \frac{2g}{5\gamma}) \tau^{*-2}. \end{cases} \quad (2.50)$$

Начальные условия для координат центра массы капли (2.45) преобразуются к виду

$$x(\tau^* = 1) = x(\tau = 0) = 0; y(\tau^* = 1) = y(\tau = 0) = 0; z(\tau^* = 1) = z(\tau = 0) = 0. \quad (2.51)$$

После интегрирования системы уравнений (2.50) и удовлетворения начальным условиям (2.51), возвращаясь к старой переменной τ , для координат центра массы капли в системе координат $OXYZ$ получим

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{2|\overline{V}_0| \cos(nx)}{\gamma} \left(\frac{1-\sqrt{1-\gamma\tau}}{\sqrt{1-\gamma\tau}} \right) + a, \\ y(\tau) = \frac{12V_B}{\gamma K_\omega^3} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma\tau}} - \frac{6V_B}{\gamma K_\omega^2} \ln|1-\gamma\tau| - \frac{6V_B}{\gamma K_\omega} \sqrt{1-\gamma\tau} - \frac{V_B(1-\gamma\tau)}{\gamma} - \frac{2C_0}{\gamma} \frac{e^{K_\omega \sqrt{1-\gamma\tau}}}{\sqrt{1-\gamma\tau}} - \frac{2K_\omega C_0}{\gamma} Ei(\sqrt{1-\gamma\tau}) + c_1 + b, \\ z(\tau) = -\frac{g}{5\gamma^2} (1-\gamma\tau)^4 + \frac{2}{\gamma} \left(|\overline{V}_0| \cos(nz) - \frac{2g}{5\gamma} \right) (1-\gamma\tau)^{-0.5} + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{g}{\gamma} - 2|\overline{V}_0| \cos(nz) \right) + c, \end{cases} \quad (2.52)$$

где

$$C_1 = \frac{6V_B}{\gamma K_\omega} - \frac{12V_B}{\gamma K_\omega^3} + \frac{V_B}{\gamma} + \frac{2C_0}{\gamma} e^{K_\omega} + \frac{2K_\omega C_0}{\gamma} Ei + c + b,$$

где a , b , c – координаты точки А размещения распылителя в системе координат $OXYZ$, м.

Полученные соотношения (2.52) описывают полет в пространстве горной выработки испаряющейся капли в зависимости от ее диаметра, угла и скорости вылета из распылителя и его расположения в сечении выработки для случая, когда сила аэродинамического сопротивления пропорциональна скорости обтекания поверхности капли нагретым газовым потоком.

Опишем полет капли в предположении, что сила аэродинамического сопротивления пропорциональна квадрату скорости, с которой газ обтекает поверхность капли, то есть рассмотрим систему дифференциальных уравнений (2.40). При этом как и прежде будем считать, что действие этой силы направлено вдоль оси OY в противоположном движению капли направлению. Для определения координат $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$ достаточно построить решение системы дифференциальных уравнений (2.44) с начальными условиями (2.45), (2.47).

Так как первое и третье уравнение системы (2.44) совпадают с соответствующими уравнениями системы (2.49) то их решение в системе координат $OXYZ$ (рисунок 2.1) имеет вид

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{2|\overline{V}_0| \cos(n, x)}{\gamma} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \gamma\tau}}{\sqrt{1 - \gamma\tau}} \right) + a, \\ z(\tau) = -\frac{g}{5\gamma^2} (1 - \gamma\tau)^2 + \frac{2}{\gamma} (|\overline{V}_0| \cos(n, z) - \frac{2g}{5\gamma}) (1 - \gamma\tau)^{-1/2} + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{g}{\gamma} - 2|\overline{V}_0| \cos(n, z) \right) + c. \end{cases} \quad (2.53)$$

Остановимся на построении решения второго уравнения системы (2.50).
Имеем

$$\ddot{y}(\tau) - \frac{3\gamma}{2} \frac{1}{1 - \gamma\tau} (\dot{y}(\tau) + V_B) = -\frac{3C_\omega}{4r_0\rho_B} \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma\tau}} (\dot{y}(\tau) - V_B)^2, \quad (2.54)$$

с начальными условиями

$$y(0) = 0; \dot{y}(0) = |\overline{V}_0| \cos(n, y). \quad (2.55)$$

Решение уравнения (2.54) будем искать в виде ряда Тейлора в окрестности точки $\tau = 0$, так как нам известны начальные условия для функции $y(\tau)$ и ее производной (2.55).

При этом условии получаем частный (и наиболее простой) случай – ряд Маклорена с остаточным членом

$$R_n = \frac{\tau^{n+1}}{(n+1)!} y^{(n+1)}(\tau) d\tau. \quad (2.56)$$

Представим искомую функцию $y(\tau)$ в виде ряда Маклорена по степеням τ и покажем алгоритм вычисления коэффициентов разложения

$$y(\tau) = y(0) + \frac{\dot{y}(0)}{1!} \tau + \frac{\ddot{y}(0)}{2!} \tau^2 + \frac{\dddot{y}(0)}{3!} \tau^3 + \frac{y^{(4)}(0)}{4!} \tau^4 + \dots, \quad (2.57)$$

или учитывая (2.55), получим

$$y(\tau) = + \frac{|\overline{V}_0| \cos \beta}{1!} \tau + \frac{\ddot{y}(0)}{2!} \tau^2 + \dots$$

Для вычисления значений второй и высших производных достаточно разрешить уравнение (2.54) относительно старшей производной. После элементарных преобразований, получим

$$\ddot{y}(\tau) = \frac{3\gamma}{2} \frac{1}{1-\gamma\tau} (\dot{y}(\tau) + V_B) - \frac{3C_\omega}{4r_0\rho_B} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma\tau}} (\dot{y}(\tau) - V_B)^2. \quad (2.58)$$

С помощью (2.55) вычислим значение $\dot{y}(\tau)$ в точке $\tau = 0$. Имеем

$$\dot{y}(0) = \frac{3\gamma}{2} (|\overline{V}_0| \cos \beta + V_B) - \frac{3C_\omega}{4r_0\rho_B} (|\overline{V}_0| \cos \beta - V_B)^2 = C_2. \quad (2.59)$$

Продифференцировав (2.47), для $\ddot{y}(\tau)$ получим выражение вида

$$\ddot{y}(\tau) = \frac{3\gamma^2}{2} \frac{1}{(1-\gamma\tau)^2} (\dot{y}(\tau) + V_B) + \frac{3\gamma}{2} \frac{1}{1-\gamma\tau} \ddot{y}(\tau) - \frac{3}{8} \frac{C_\omega\gamma}{r_0\rho_B} \frac{1}{(1-\gamma\tau)^{\frac{3}{2}}} (\dot{y} - V_B)^2 - \frac{3}{2} \frac{C_\omega}{r_0\rho_B} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma\tau}} (\dot{y}(\tau) - V_B) \ddot{y}(\tau). \quad (2.60)$$

С помощью соотношения (2.60), учитывая (2.59), вычислим значение третьей производной $y^{(III)}(\tau)$ в точке $\tau = 0$. Получим

$$y^{(III)}(\tau) = \ddot{y}(0) = \frac{3\gamma^2}{2}(C_1 + V_B) + \frac{3\gamma}{2}C_2 - \frac{3}{8} \frac{C_\omega \gamma}{r_0 \rho_B} (C_1 - V_B)^2 - \frac{3}{2} \frac{C_\omega}{r_0 \rho_B} (C_1 - V_B)C_2 = C_3, \quad (2.61)$$

где

$$C_1 = |\overline{V}_0| \cos \beta - V_B.$$

Таким образом, описан алгоритм вычисления n -ой производной $y^{(n)}(0)$ через известные значения производных низшего порядка.

При $n = 4$:

$$R_4 = \frac{\tau^4}{(4+1)!} y^{(4+1)}(\tau) d\tau = \frac{\tau^4}{5!} y^{(5)}(\tau) d\tau, \quad R_4 \rightarrow 0, \tau \rightarrow 0.$$

Поскольку ряд (2.57) быстро сходится, то для функции $y(\tau)$ достаточно ограничиться четырьмя членами. Тогда, для координаты центра массы капли $y(\tau)$ имеем

$$y(\tau) \approx C_1 \tau + \frac{C_2}{2!} \tau^2 + \frac{C_3}{3!} \tau^3. \quad (2.62)$$

Полученное соотношение (2.62) в совокупности с (2.53) определяют местоположение центра массы капли в каждый момент времени после ее вылета из распылителя до полного испарения либо оседания на поверхности горной выработки.

Координаты центра массы капли в любой момент времени ее полета в системе координат $OXYZ$ определяются соотношениями

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{2|\overline{V}_0| \cos(n, x)}{\gamma} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \gamma\tau}}{\sqrt{1 - \gamma\tau}} \right) + a, \\ y(\tau) = C_1 \tau + \frac{C_2}{2!} \tau^2 + \frac{C_3}{3!} \tau^3 + b, \\ z(\tau) = -\frac{g}{5\gamma^2} (1 - \gamma\tau)^2 + \frac{2}{\gamma} (|\overline{V}_0| \cos(n, z) - \frac{2g}{5\gamma}) (1 - \gamma\tau)^{-1/2} + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{g}{\gamma} - 2|\overline{V}_0| \cos(n, z) \right) + c. \end{cases} \quad (2.63)$$

В случае, если аэродинамическим сопротивлением однонаправленного нагретого газового потока можно пренебречь по сравнению с действием гравитационного поля, то после интегрирования системы уравнений (2.49) и удовлетворения начальным условиям для координат центра массы капли в любой момент времени в системе координат $OXYZ$ получим выражения вида

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{2|\overline{V}_0| \cos(n, x)}{\gamma} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \gamma\tau}}{\sqrt{1 - \gamma\tau}} \right) + a, \\ y(\tau) = \frac{2|\overline{V}_0| \cos(n, y)}{\gamma} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \gamma\tau}}{\sqrt{1 - \gamma\tau}} \right) - V_B \tau + b, \\ z(\tau) = -\frac{g}{5\gamma^2} (1 - \gamma\tau)^2 + \frac{2}{\gamma} (|\overline{V}_0| \cos(n, z) - \frac{2g}{5\gamma}) (1 - \gamma\tau)^{-1/2} + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{g}{\gamma} - 2|\overline{V}_0| \cos(n, z) \right) + c. \end{cases} \quad (2.64)$$

Соотношения (2.64) позволяют изучить траектории полета испаряющихся капель в пространстве горной выработки.

На рисунке 2.2 изображены траектории полета капель при различных углах вылета их из сопла распылителя. При этом изменение угла вылета рассматривалось в интервале, ограниченном максимальным углом раскрытия факела. Траектория полета капли рассматривалась во временном интервале от нуля до времени ее испарения $\tau_{\text{исп}}$. Расчет времени испарения капли производился по формуле, полученной в работе [109], в которой учитывался диаметр испаряющейся капли, температура нагретого газа и другие критерии.

На рисунке 2.3 представлены результаты расчета траектории полета испаряющейся капли, когда распылитель смещен относительно центра выработки, при тех же значениях параметров, входящих в соотношение (2.64). Анализ рассчитанных траекторий полета капель в пространстве, ограниченном горной выработкой, указывает на то, что количество распыленной воды, оседающей на ее поверхности, зависит от расположения распылителя в сечении выработки, диаметра, угла и начальной скорости вылета капель из сопла. Это дает возможность при прочих равных значениях параметров обосновать рациональное размещение центробежно-струйных распылителей, обеспечивающее наиболее полное

использование мелкораспыленной воды для понижения температуры нагретого газового потока до безопасной.

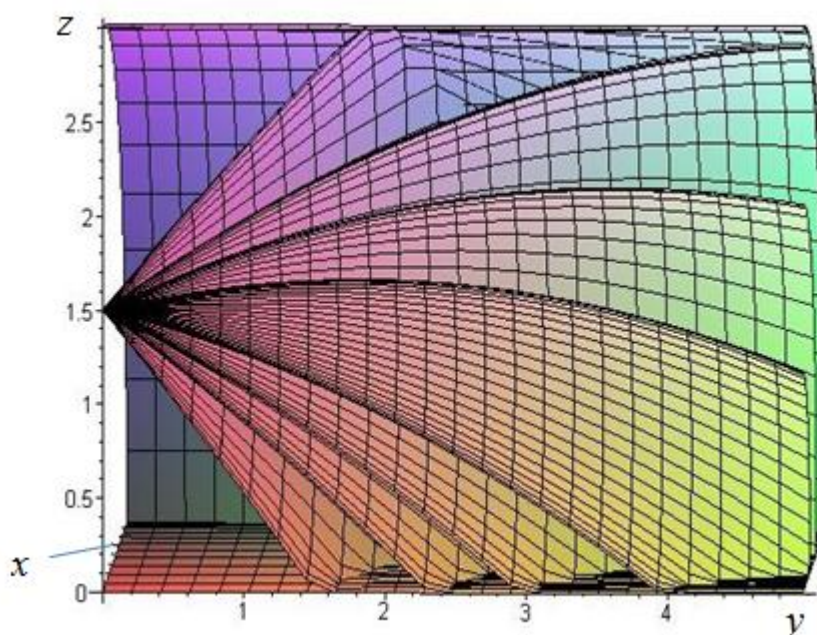


Рисунок 2.2 – Траектории полета капель в горной выработке – распылитель находится в центре выработки: $a=0$, $b=0$, $c=1,5$.

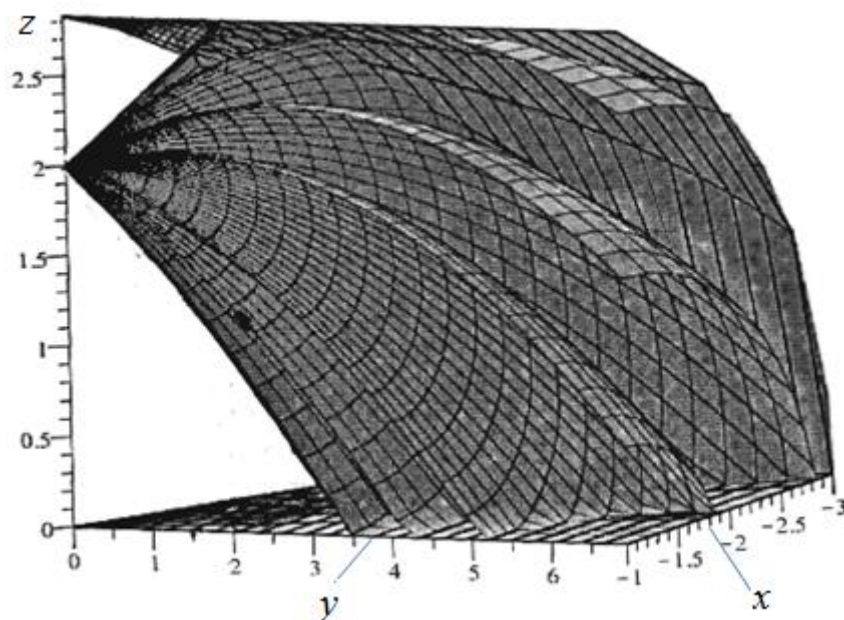


Рисунок 2.3 – Траектории полета капель в горной выработке – распылитель смещен относительно центра: $a=1$, $b=0$, $c=2,0$.

Кроме этого, соотношения (2.64) позволяют сделать предварительную оценку глубины водяной завесы, создаваемой распылителем.

Для этого достаточно в плоскости ZOY третье уравнение системы (2.64) приравнять к нулю

$$z(\tau) = 0. \quad (2.65)$$

Решив уравнение (2.64), определим время полета капли, вылетающей из сопла под углом β_k

$$\beta_k = \frac{\pi}{2} - \arccos(n, z). \quad (2.66)$$

Далее подставим значение найденного времени в функцию $y(\tau)$, учитывая, что $\cos(n, y) = \cos(\beta_k)$.

Тогда глубина завесы L_0 , м, будет равна наибольшему значению $y(\tau)$ в интервале $[0, \tau_{\text{исп}}]$.

Важным параметром, который характеризует эффективность водяной завесы, является коэффициент распределения воды. Представим его как отношение объема воды, отбирающей тепло нагретого газового потока за счет испарения капель, ко всему объему, вылетающему из сопла распылителя в единицу времени.

Для определения количества воды, попадающей на стенки и почву выработки до полного испарения, поступим следующим образом.

Определим угол вылета капли из сопла, при котором капля не коснется стенок выработки и будет продолжать свое движение до полного испарения либо оседания на почву. С этой целью в сечении ZOY найдем максимум по координате $z(\tau)$ траектории капли. Имеем

$$\dot{z}(\tau) = \frac{2g}{5\gamma} (1 - \gamma\tau) + \left(|\overline{V}_0| \cos(n, z) - \frac{2g}{5\gamma} \right) (1 - \gamma\tau)^{-3/2} = 0. \quad (2.67)$$

Решив уравнение (2.67) найдем $\tau_{\max}$ в виде

$$\tau_{\max} = \left[1 - \left(1 - \frac{5\gamma|\overline{V}_0|\cos(n,z)}{2g} \right)^{2/5} \right] \gamma^{-1}, \quad (2.68)$$

где $\tau_{\max}$ – время, при котором координата $z(\tau)$ принимает наибольшее значение, с.

При таком значении времени координата $z(\tau)$ достигает своего максимума при каждом значении направляющего косинуса $\cos(n, z)$.

Подставив выражение (2.68) в третье уравнение системы (2.64) и приравняв к высоте выработки, получим уравнение, из которого определим значение направляющего косинуса $\cos(n, z)$

$$-\frac{g}{5\gamma^2}(1 - \gamma\tau_{\max})^2 + \frac{2}{\gamma}\left(|\overline{V}_0|\cos(n, z) - \frac{2g}{5\gamma}\right)(1 - \gamma\tau_{\max})^{-1/2} + \frac{1}{\gamma}\left(\frac{g}{\gamma} - 2|\overline{V}_0|\cos(n, z)\right) = H - c, \quad (2.69)$$

где H – высота выработки, м;

c – координата по оси OZ места расположения распылителя, м.

В плоскости ZOY $\cos(n, y) = \cos \beta_k$, $\cos(n, x) = \frac{\pi}{2}$. Тогда угол вылета капли β_o , при котором она не попадает на стенку выработки, определяется соотношением

$$\beta_o = \frac{\pi}{2} - \arccos(n, z). \quad (2.70)$$

Обозначим через $\beta_{\max}$ угол раскрытия факела распылителя. Тогда капли, вылетающие из сопла под углом $\beta \in (-\beta_{\max}; -\beta_o) \cup (\beta_o; \beta_{\max})$, оседают на стенках выработки, а при $\beta \in (-\beta_o; \beta_o)$ продолжают полет до полного испарения либо до оседания на поверхности почвы выработки.

Введем коэффициент распределения воды K_p как отношение объема испарившейся воды к общему подаваемому объему. Тогда

$$K_p = \frac{Q - Q_*}{Q}, \quad (2.71)$$

где Q – объем подаваемой в единицу времени распыленной воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_* – количество воды, оседающей в единицу времени на стенках и почве горной выработки, $\text{м}^3/\text{с}$,

коэффициент оседания

$$k_{\text{ос}} = \frac{Q_*}{Q} = 1 - K_p. \quad (2.72)$$

Объем распыленной воды Q , м^3 , вылетающей из сопла распылителя за период времени $\tau_{\text{исп}}$, может быть вычислен по формуле

$$Q = \pi r_c^2 U_{\text{сх}} \tau_{\text{исп}}, \quad (2.73)$$

где r_c – радиус сопла, м;

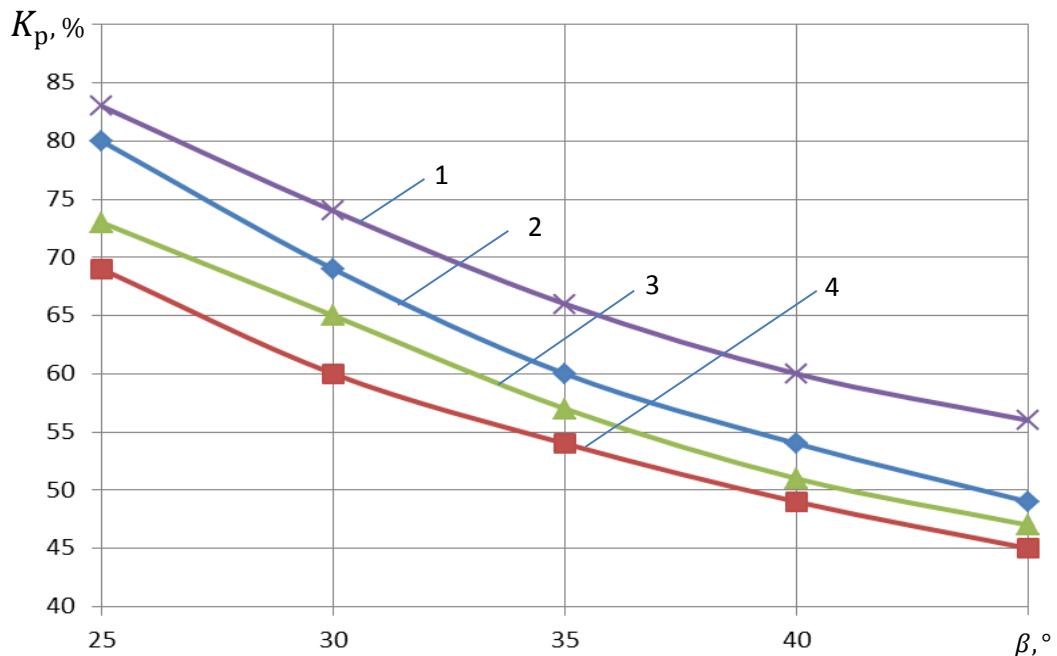
$U_{\text{сх}}$ – поступательная скорость вылета, м/с.

Для расчета времени, необходимого для полного испарения $\tau_{\text{исп}}$ вылетающих из распылителя каплей диаметром d_0 , можно воспользоваться результатами исследований, приведенных в работе [109]. В этой работе в формуле расчета $\tau_{\text{исп}}$ входят параметры, характеризующие протекание физического процесса при создании водяной завесы с целью локализации пожара в горной выработке.

Далее с помощью соотношений (2.64) определяется объем той части факела, в котором капли воды оседают на поверхности горной выработки или на ее почве. Для этого временной интервал полета капли до ее полного испарения $[0; \tau_{\text{исп}}]$ разбивается на небольшие промежутки и в конце каждого из них рассчитываются координаты центра массы капли. Если координаты удовлетворяют уравнению поверхности горной выработки и время ее полета меньше $\tau_{\text{исп}}$, то считаем, что капля оседает на стенках выработки; если пространственная координата $z(\tau) \leq 0$, то считаем, что капля осела на почве выработки. С помощью этого подхода

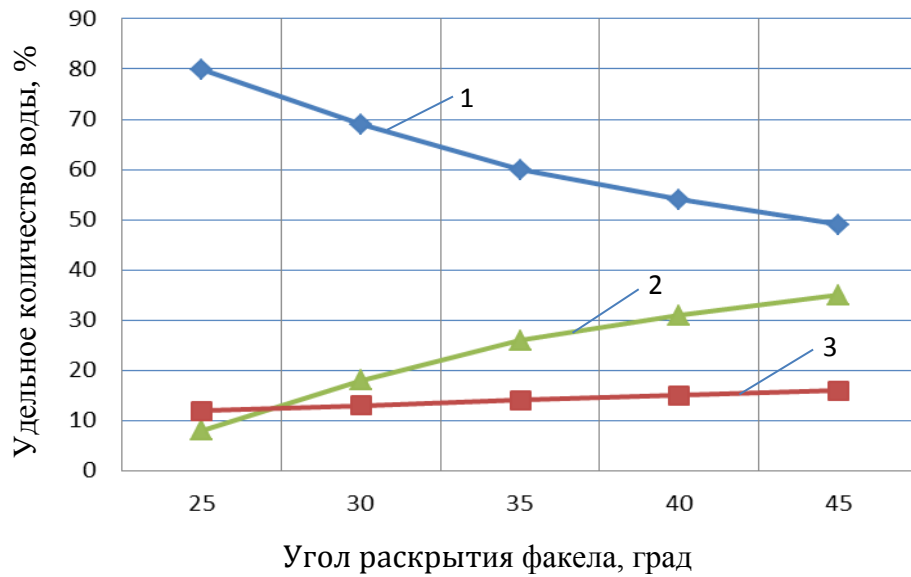
определяется объем Q_* , в котором капли, не полностью испарившиеся, оседают на стенках и почве выработки. Причем удастся разделить Q_* на две составляющие, одна из которых соответствует воде, попадающей на стенки горной выработки, а другая – и на ее почву.

Из соотношений (2.64), (2.71), (2.73) следует, что K_p является функцией, зависящей от угла раскрытия факела β , скорости вылета $|\overline{V}_0|$ и месторасположения распылителя. Ниже на рисунках 2.4-2.8 приведены результаты численного исследования этой зависимости в случае, когда гидравлические параметры остаются неизменными.



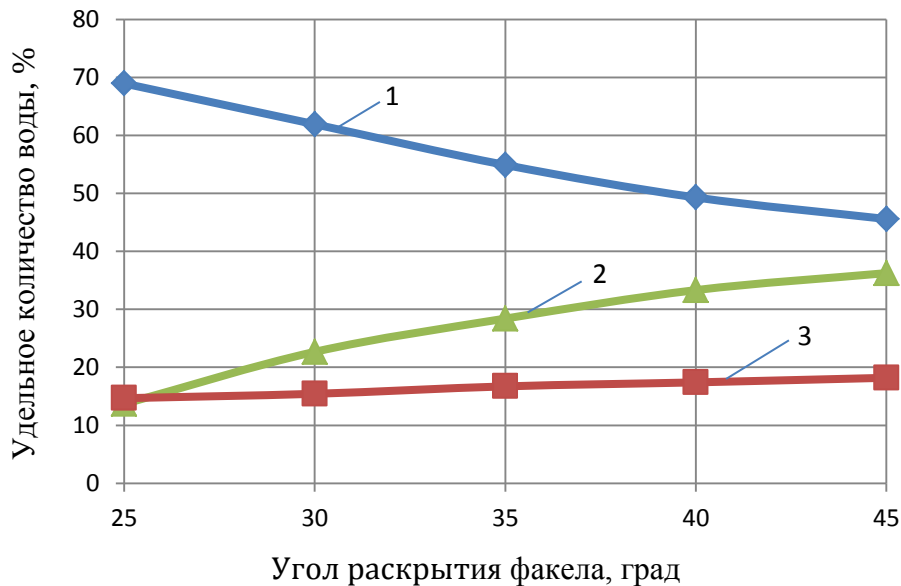
1 – точка $a=0, c=1,5$ м; 2 – точка $a=0, c=2$ м;
3 – точка $a=1$ м, $c=1,5$ м; 4 – точка $a=1$ м, $c=2$ м

Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента распределения воды K_p от угла раскрытия факела β ° распылителя и его месторасположения



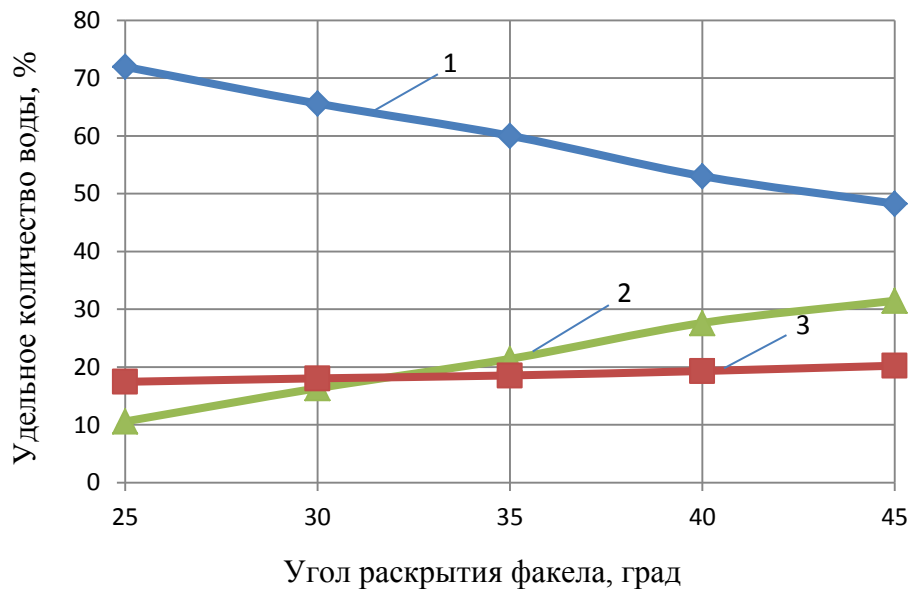
1 – количество воды, участвующей в локализации; 2 – количество воды, оседающей на стенки и кровлю выработки; 3 – количество воды, оседающей на почву выработки

Рисунок 2.5 – Зависимость удельного количества воды от угла раскрытия факела, при $a=0$, $b=0$, $c=2$ м



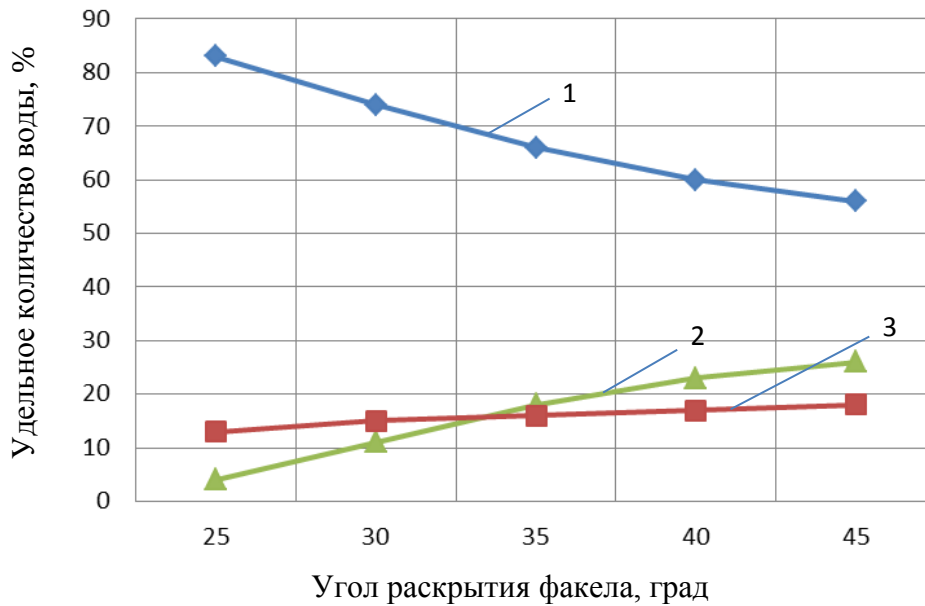
1 – количество воды, участвующей в локализации; 2 – количество воды, оседающей на стенки и кровлю выработки; 3 – количество воды, оседающей на почву выработки

Рисунок 2.6 – Зависимость удельного количества воды от угла раскрытия факела, при $a=1$ м, $b=0$, $c=2$ м



1 – количество воды, участвующей в локализации; 2 – количество воды, оседающей на стенки и кровлю выработки; 3 – количество воды, оседающей на почву выработки

Рисунок 2.7 – Зависимость удельного количества воды от угла раскрытия факела, при $a=1$ м, $b=0$, $c=1,5$ м



1 – количество воды, участвующей в локализации; 2 – количество воды, оседающей на стенки и кровлю выработки; 3 – количество воды, оседающей на почву выработки

Рисунок 2.8 – Зависимость удельного количества воды от угла раскрытия факела, при $a=0$, $b=0$, $c=1,5$ м

Анализ приведенных графиков доказывает, что коэффициент распределения воды K_p существенно зависит от месторасположения распылителя, его геометрических параметров, которые формируют угол раскрытия факела β .

На рисунке 2.9 приведены результаты численного анализа изменения коэффициента оседания k_{oc} в зависимости от начальной скорости вылета воды из сопла и максимального угла раскрытия факела при различных расположениях распылителя в сечение горной выработки.

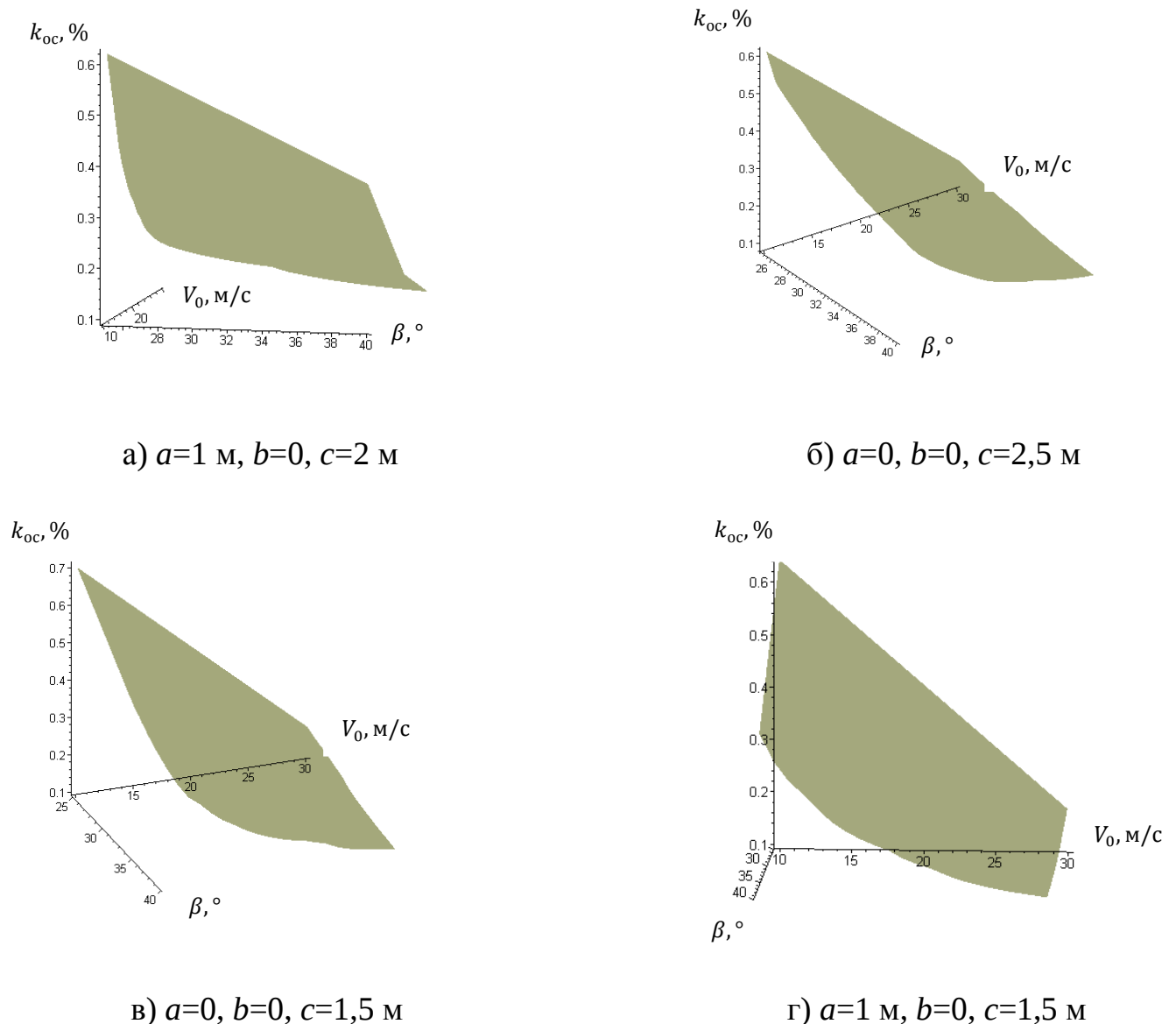
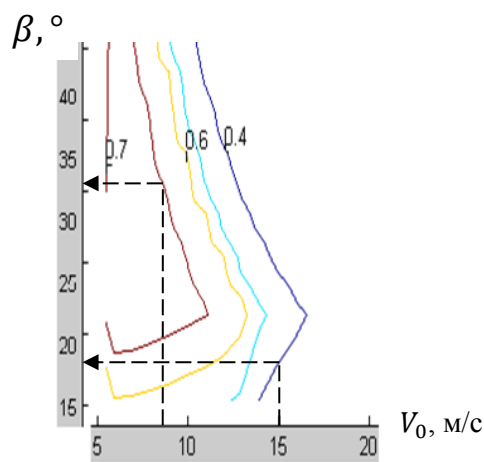


Рисунок 2.9 – Результаты анализа изменения коэффициента оседания k_{oc} в зависимости от скорости вылета капли и угла раскрытия факела при различных расположениях распылителя в сечении горной выработки

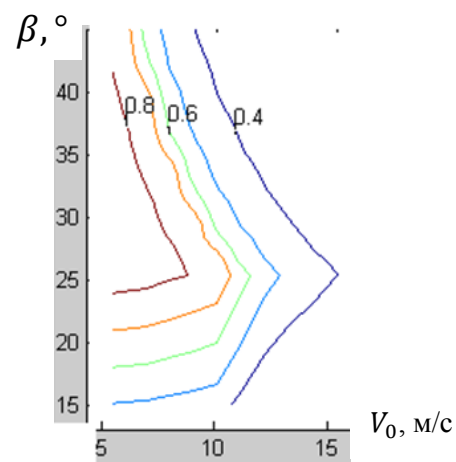
На рисунке 2.10 изображены номограммы, позволяющие определить $k_{ос}$ для различных значений угла раскрытия факела и начальной скорости при различных расположениях распылителя в сечении горной выработки.

Задаваясь расположением распылителя (a , b , c) для различных углов раскрытия факела β , град, и скорости вылета капли V_0 , м/с, получаем различные значения коэффициента $k_{ос}$.

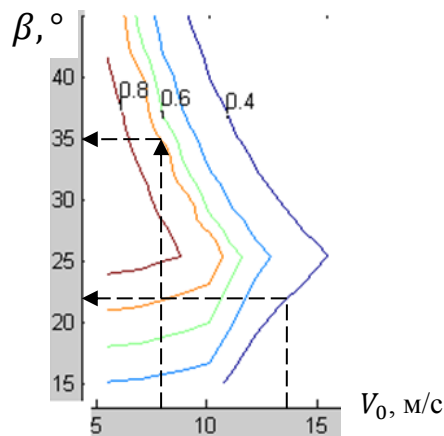
Отсюда, из условия $k_{ос} \rightarrow \min$ или $K_p \rightarrow \max$ выбираем оптимальное расположение распылителя в выработке при одинаковых значениях β и V_0 .



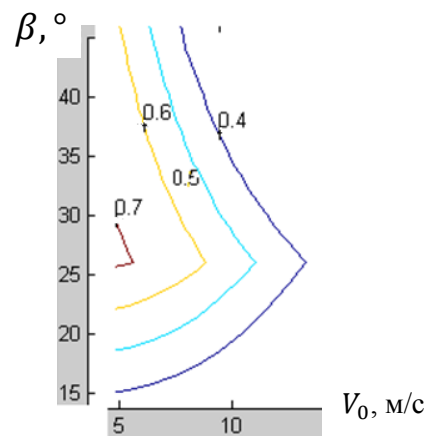
а) $a=0, b=0, c=1,5$ м



б) $a=0, b=0, c=2$ м



в) $a=0, b=0, c=2,5$ м



г) $a=1$ м, $b=0, c=1,5$ м

Рисунок 2.10 – Номограммы зависимости коэффициента оседания $k_{ос}$ от угла раскрытия факела β и начальной скорости вылета капли V_0 для различных расположений распылителей

Эта методика позволяет выбрать рациональное расположение распылителей, обеспечивающих максимальный отбор тепла от проходящего сквозь водяную завесу нагретого газового потока, при соблюдении нормативных требований по увлажнению горной выработки.

При создании водяной завесы из мелкораспыленной воды для локализации пожара в горной выработке целесообразно использовать центробежно-струйные распылители, так как для них значение коэффициента распределения K_p превосходит аналогичные показатели для центробежных распылителей независимо от их месторасположения.

На основе численных расчетов построены номограммы для оценки величин коэффициентов распределения и оседания подаваемой мелкораспыленной воды в зависимости от расположения распылителя в сечении горной выработки, скорости вылета и диаметра капли, угла раскрытия факела. Это позволяет в каждом конкретном случае обосновать наиболее рациональное расположение распылителей, обеспечивающих понижение температуры газового потока до безопасной при выходе его из водяной завесы.

Таким образом, в результате проведенных исследований о движении мелкораспыленной воды совместно с потоком нагретых пожарных газов в пространстве, ограниченном горной выработкой, установлены зависимости количества воды, расходуемой на охлаждение пожарных газов, от их температуры, геометрических параметров распылителей и мест их расположения в сечении выработки, что позволило рассчитать коэффициент распределения воды на локализацию пожара и рациональное размещение распылителей на защищаемом объекте.

2.3 Выбор и обоснование параметров центробежно-струйного распылителя

Практикой применения распылителей показано, что как центробежные, так и струйные распылители не дают достаточной полноты заполнения факела. Для

центробежных распылителей имеет место большой угол раскрытия факела, но при этом наличие воздушного вихря обуславливает присутствие внутри него некоторого объема, не занятого каплями. Это приводит к неравномерному распределению капель воды в факеле. Характерной особенностью струйных распылителей является то, что капли воды в факеле равномерно распределены во всей его области. Однако угол раскрытия относительно мал, что не позволяет перекрыть все сечение выработки. Отличительной особенностью центробежно-струйных распылителей является то, что вода подается в распылитель в виде двух потоков, которые смешиваются в камере смешивания, а затем поступают в сопловой канал. В камеру смешивания часть воды поступает через центральный канал. Другой поток поступает через тангенциальные каналы, расположенные в конце усеченного конусоидального вкладыша. Тангенциальные каналы сообщаются с камерой смешивания и расположены под прямым углом к оси камеры, которая в свою очередь совпадает с осью соплового канала. Тангенциальные каналы расположены таким образом, что поток воды при попадании в камеру смешивания закручивается и раскручивает центральный поток. Таким образом, в камере смешивания образуется поток вращающейся воды, которая за счет поступательной скорости центрального потока и перепада давления в потоке воды и вне распылителя устремляется в сопловой канал, из которого вылетает в виде капель, образуя факел. В этом случае получаем факел, угол раскрытия которого значительно превосходит угол раскрытия факела для струйных распылителей, и в отличие от центробежных распылителей, капли воды в нем распределены по всему поперечному сечению.

Для аналитического описания движения воды в камере смешивания поступим следующим образом. Запишем равенство кинетической энергии, которой обладают потоки в момент попадания в камеру смешивания, с кинетической энергией общего потока воды с учетом потерь энергии на раскручивание центрального потока и гидравлический удар, который испытывает центральный поток при вхождении в камеру смешивания. Последнее обусловлено тем, что радиус поперечного сечения центрального канала существенно меньше радиуса поперечного сечения камеры смешивания.

С учетом этих посылок уравнение равенства кинетической энергии представим в виде

$$E_o + E_T = E_{\text{кс}} + E_{\text{уд}} + E_{o\phi}, \quad (2.74)$$

где E_o – кинетическая энергия центрального потока при входе в камеру смешивания, Дж;

E_T – суммарная кинетическая энергия воды, которая поступает в камеру смешивания через тангенциальные каналы, Дж;

$E_{\text{кс}}$ – кинетическая энергия, которой обладает вода в камере смешивания, поступившая в нее через центральный и тангенциальные каналы, Дж;

$E_{\text{уд}}$ – потеря энергии при входе центрального потока в камеру смешивания в результате его внезапного расширения (гидроудар), Дж, [110];

$E_{o\phi}$ – кинетическая энергия, потраченная на раскручивание потока воды, поступающего в камеру смешивания через центральный канал, Дж.

Найдем связь между поступательной скоростью воды, выходящей из сопла, и скоростью входящих в камеру смешивания потоков воды, считая, что поступательная составляющая скорости воды в камере смешивания и в сопловом канале равны и что количество воды, поступающей в камеру смешивания, равно количеству воды, выходящей из сопла. Имеем

$$Q_o + Q_T = Q_c, \quad (2.75)$$

где Q_o – количество воды, поступающей в единицу времени через центральный канал, м³/с;

Q_T – суммарное количество воды, поступающей в единицу времени в камеру смешивания через тангенциальные каналы, м³/с;

Q_c – количество воды, вытекающей в единицу времени из сопла, м³/с.

Будем считать, что центральный и тангенциальные каналы полностью заполнены водой. Обозначим через $U_o, f_o, U_{\text{вх}}, f_T, U_{\text{сх}}, f_c$ скорости входа воды и площадь

поперечного сечения центрального и тангенциального каналов, поступательную составляющую скорости выхода воды и площадь поперечного сечения сопла, соответственно.

Конструктивные особенности рассматриваемого распылителя таковы (рисунок 2.11), что площадь поперечного сечения центрального канала при входе в камеру смешивания и площадь просвета перед входом в тангенциальные каналы существенно меньше площади входа в центральный канал и площади просвета при продвижении воды в распылителе к тангенциальным каналам.

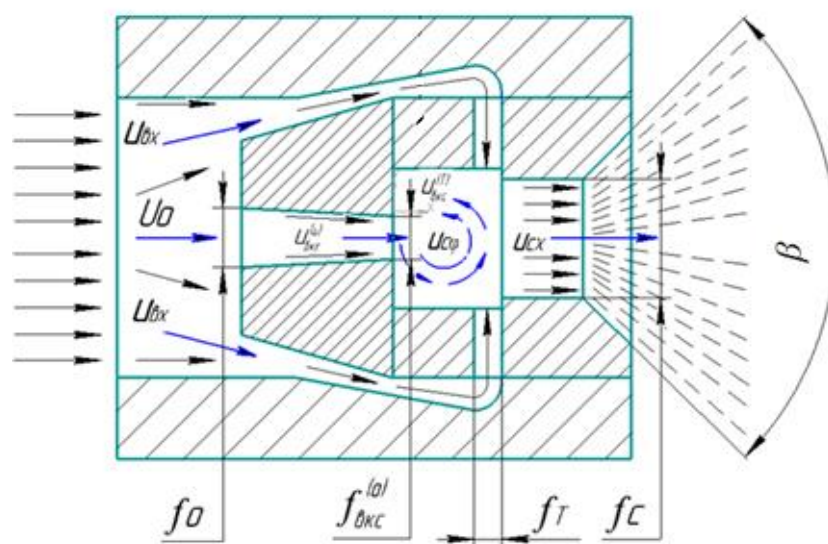


Рисунок 2.11 – Схема центробежно-струйного распылителя

Поэтому скорости в начале движения в распылителе и скорости входа в тангенциальные каналы будут существенно отличаться друг от друга и соотношения для центрального и тангенциальных потоков будут таковы

$$U_o f_o = U_{\text{ВКС}}^{(o)} f_{\text{ВКС}}^{(o)}, \quad (2.76)$$

$$U_{\text{ВХ}} S_o = U_{\text{ВКС}}^{(T)} S_1, \quad (2.77)$$

где S_0 , S_1 – площади просветов в начале распылителя и перед входом воды в тангенциальные каналы, соответственно, м^2 ;

$U_{\text{ВКС}}^{(o)}$, $U_{\text{ВКС}}^{(т)}$, – скорости входа в камеру смешивания через центральный и тангенциальные каналы, м/с ;

$f_{\text{ВКС}}^{(o)}$ – площадь сечения центрального канала при входе в камеру смешивания, м^2 .

Учитывая (2.76), (2.77) введем коэффициенты $\alpha_*^{(1)}$ и α_* , которые в дальнейшем будем называть скоростными

$$\alpha_*^{(1)} = \frac{f_o}{f_{\text{ВКС}}^{(o)}} = \frac{U_{\text{ВКС}}^{(o)}}{U_o}, \quad \alpha_* = \frac{S_1}{S_0} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВКС}}^{(т)}}. \quad (2.78)$$

Эти коэффициенты характеризуют соотношение скоростей при входе в центральный канал и в камеру смешивания ($\alpha_*^{(1)}$), а также между скоростью воды в распылителе до входа в тангенциальные каналы $U_{\text{ВХ}}$ и скоростью воды $U_{\text{ВКС}}^{(т)}$ при входе ее через эти каналы в камеру смешивания (α_*). Введенные скоростные коэффициенты позволяют учесть конструктивные особенности распылителя.

Не нарушая общности можно считать, что

$$U_o = U_{\text{ВХ}}; \quad U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВКС}}^{(т)} \alpha_*. \quad (2.79)$$

Учитывая (2.76), из соотношений (2.77)

$$U_{\text{ВКС}}^{(o)} = \alpha_*^{(1)} \alpha_* U_{\text{ВКС}}^{(т)}. \quad (2.80)$$

Тогда количество воды, которая поступает в камеру смешивания в единицу времени, с учетом выражений (2.79), (2.80) определяется соотношением

$$U_{\text{ВКС}}^{(т)} \alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{ВКС}}^{(o)} + U_{\text{ВКС}}^{(т)} \sum f_T = U_{\text{сх}} \mu f_c. \quad (2.81)$$

где μ – коэффициент расхода сопла.

Из уравнения (2.81) получаем соотношения, связывающие скорости входа воды в камеру смешивания с поступательной составляющей скорости выхода потока воды из сопла

$$U_{\text{ВКС}}^{(\text{T})} = \frac{U_{\text{сх}} \mu f_{\text{с}}}{\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{ВКС}}^{(o)} + \sum f_T}, \quad (2.82)$$

$$U_{\text{ВКС}}^{(o)} = \frac{U_{\text{сх}} \alpha_*^{(1)} \alpha_* \mu f_{\text{с}}}{\alpha_*^{(o)} \alpha_* f_{\text{ВКС}}^{(o)} + \sum f_T}. \quad (2.83)$$

Запишем выражения для кинетических энергий, входящих в уравнение (2.74)

$$E_o = \frac{m_o (U_{\text{ВКС}}^{(o)})^2}{2}, \quad E_T = \frac{m_T (U_{\text{ВКС}}^{(\text{T})})^2}{2}, \quad E_{\text{КС}} = \frac{M (U_{\text{сх}}^2 + U_{\text{ВКС}}^2)}{2}, \quad (2.84)$$

$$E_{o\varphi} = \frac{m_o U_{\text{сх}}^2}{2}, \quad E_{\text{уд}} = m_o (U_{\text{ВКС}}^{(o)} - U_{\text{сх}})^2.$$

Массы m_o , m_T потоков воды, поступающей в камеру смешивания, и общую массу воды M , кг/с, в единицу времени в камере смешивания запишем в виде

$$m_o = \rho U_{\text{ВКС}}^{(o)} f_{\text{ВКС}}^{(o)}, \quad m_T = \rho U_{\text{ВКС}}^{(\text{T})} \sum f_T,$$

$$M = m_o + m_T = U_{\text{ВКС}}^{(\text{T})} (\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{ВКС}}^{(o)} + \sum f_T) \rho. \quad (2.85)$$

Подставив выражение (2.85) в равенство (2.84) и учитывая (2.80) для каждого из слагаемых уравнения (2.74) получим следующие выражения

$$E_o = \frac{m_o (U_{\text{ВКС}}^{(o)})^2}{2} = \frac{\rho}{2} (\alpha_*^{(1)} \alpha_*)^3 (U_{\text{ВКС}}^{(\text{T})})^3 f_{\text{ВКС}}^{(o)},$$

$$E_T = \frac{m_T (U_{\text{BKC}}^{(T)})^2}{2} = \frac{\rho}{2} (U_{\text{BKC}}^{(T)})^3 \sum f_T,$$

$$E_{\text{KC}} = \frac{M(U_{c\varphi}^2 + U_{cx}^2)}{2} = \frac{\rho}{2} U_{\text{BKC}}^{(T)} \left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T \right) (U_{c\varphi}^2 + U_{cx}^2), \quad (2.86)$$

$$E_{o\varphi} = \frac{m_o U_{c\varphi}^2}{2} = \frac{\rho}{2} \alpha_*^{(1)} \alpha_* U_{\text{BKC}}^{(T)} f_{\text{BKC}}^{(o)} U_{c\varphi}^2,$$

$$E_{\text{уд}} = \frac{\rho}{2} \left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* - \frac{U_{cx}}{U_{\text{BKC}}^{(T)}} \right)^2 \alpha_*^{(1)} \alpha_* \left(U_{\text{BKC}}^{(T)} \right)^3 f_{\text{BKC}}^{(o)}.$$

Подставим выражение (2.86) в уравнение (2.74). После ряда элементарных преобразований получим равенство

$$\left(\frac{U_{c\varphi}}{U_{cx}} \right)^2 = \left(\frac{\left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* \right)^3 f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T}{2 \alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T} - \left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* \left(1 - \frac{f_{\text{BKC}}^{(o)}}{f_c} \right) - \frac{\sum f_T}{f_c} \right)^2 \alpha_*^{(1)} \right) * \\ * \alpha_* \frac{f_{\text{BKC}}^{(o)}}{2 \alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T} \frac{\mu^2 f_c^2}{\left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T \right)^2}, \quad (2.87)$$

ИЛИ

$$\frac{U_{c\varphi}}{U_{cx}} = \left(\frac{\left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* \right)^3 f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T}{2 \alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T} - \left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* \left(1 - \frac{f_{\text{BKC}}^{(o)}}{f_c} \right) - \frac{\sum f_T}{f_c} \right)^2 \alpha_*^{(1)} \alpha_* \frac{f_{\text{BKC}}^{(o)}}{2 \alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T} \right)^{0,5} \frac{\mu f_c}{\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{\text{BKC}}^{(o)} + \sum f_T}. \quad (2.88)$$

Соотношение (2.88) определяет угол раскрытия факела.

Основываясь на результатах опытов, проведенных при изучении смешивания потоков [111], и проводя аналогию с рассматриваемым движением воды для центробежно-струйного распылителя, будем считать, что распределение аксиальной составляющей скорости U_{cx} в камере смешивания с достаточной степенью точности будет равномерным. Распределение тангенциальной составляющей скорости $U_{c\varphi}$

как в камере смешивания, так и в сопловом канале подчиняется линейному закону и может быть представлено в виде

$$U_{c\varphi} = U_{c\varphi}^o \frac{r_k}{r_c}, \quad (2.89)$$

где r_k – текущая координата от оси камеры смешивания;

$U_{c\varphi}^o$ – величина тангенциальной скорости в камере смешивания на ее внутренней поверхности, м/с.

При движении идеальной жидкости для любых двух сечений потока справедливо уравнение Бернулли [112]

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{ст}} + \frac{\rho}{2} (U_{cx}^2 + U_{c\varphi}^2). \quad (2.90)$$

Из уравнения (2.90) следует, что энергия напора в подводящем трубопроводе расходуется на создание аксиальной и тангенциальной составляющих скорости потока воды в камере смешивания и сопловом канале, а также статического давления, обусловленного закручиванием потока.

В общем случае распределение скоростей и статического давления по сечению носит неравномерный характер. Поэтому целесообразно в уравнении (2.90) перейти к средним значениям этих величин. Имеем

$$P_{\text{ж}} = \overline{P_{\text{ст}}} + \frac{\rho}{2} (\overline{U_{cx}^2} + \overline{U_{c\varphi}^2}). \quad (2.91)$$

Для определения расходных характеристик распылителя определим значения величин, входящих в уравнение (2.91).

Считаем, что центробежная сила уравновешивается разностью сил давления на боковую поверхность элемента жидкости толщиной dr , длиной dl , расположенного на r_k от оси, т.е.

$$dl dP_{\text{ст}} = \frac{U_{c\varphi}^2}{r_k} dm. \quad (2.92)$$

Масса элемента dm равна

$$dm = \rho_{\text{ж}} dl dr. \quad (2.93)$$

Подставив (2.93) в (2.92) и учитывая (2.89), приходим к дифференциальному уравнению, вида

$$dP_{\text{ст}} = \frac{(U_{c\varphi}^0)^2}{r_c^2} \rho_{\text{ж}} r dr. \quad (2.94)$$

Проинтегрировав уравнение (2.94), получим

$$P_{\text{ст}}(r_k) = \frac{\rho_{\text{ж}} (U_{c\varphi}^0)^2}{2 r_c^2} r_k^2 + C. \quad (2.95)$$

Постоянную интегрирования C определим, считая, что на оси давление равно P_0 . Окончательно функция распределения статического давления примет вид

$$P_{\text{ст}}(r_k) = \frac{\rho_{\text{ж}} (U_{c\varphi}^0)^2}{2 r_c^2} r_k^2 + P_0, \quad (2.96)$$

или

$$P_{\text{ст}}(r_k) - P_0 = \frac{\rho_{\text{ж}}}{2} (U_{c\varphi}^0)^2 \left(\frac{r_k}{r_c} \right)^2. \quad (2.97)$$

Избыточное среднее статическое давление и среднерасходное значение составляющей скорости будут выражаться соотношениями

$$\overline{P_{\text{ст}}} - P_0 = \rho_{\text{ж}} \frac{(U_{c\varphi}^0)^2}{4}, \quad (2.98)$$

$$\overline{U_{c\varphi}^2} = \frac{(U_{c\varphi}^0)^2}{2}. \quad (2.99)$$

Решив систему уравнений (2.88), (2.91), (2.98), (2.99), получим выражение для аксиальной составляющей скорости воды в виде

$$U_{cx} = \sqrt{\frac{2(P_{ж}-P_0)}{\rho_{ж}(1+\theta_{\Gamma}(f_o, f_c, f_T))}}, \quad (2.100)$$

где θ_{Γ} – геометрический комплекс, который имеет вид [113]

$$\theta_{\Gamma}(f_o, f_c, f_T) = \left(\frac{(\alpha_*^{(1)} \alpha_*)^3 f_{BKC}^{(o)} + \Sigma f_T}{2\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{BKC}^{(o)} + \Sigma f_T} - \left(\alpha_*^{(1)} \alpha_* \left(1 - \frac{f_{BKC}^{(o)}}{f_c} \right) - \frac{\Sigma f_T}{f_c} \right)^2 \alpha_*^{(1)} * \alpha_* \frac{f_{BKC}^{(o)}}{2\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{BKC}^{(o)} + \Sigma f_T} \right) \left(\frac{\mu f_c}{\alpha_*^{(1)} \alpha_* f_{BKC}^{(o)} + \Sigma f_T} \right)^2. \quad (2.101)$$

Таким образом, полученное решение позволяет описать процесс движения воды через распылитель в зависимости от давления в противопожарном трубопроводе и конструктивных особенностей распылителя.

Так как для всех конструкций центробежно-струйных распылителей существуют единые закономерности дробления жидкости, то в качестве расчетного уравнения для определения диаметра капель воды после ее выхода из сопла воспользуемся критериальным уравнением вида [114]

$$\frac{d_{cp}}{d_c} = 0,041 We^{-0,27} Lp^{0,15} N^{0,34} \theta_{\Gamma 1}^{-0,63}, \quad (2.102)$$

где $N = \frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}}$ – отношение вязкости жидкости и газов;

$We = \frac{U_{cx}^2 \rho_{ж} d_c}{\sigma}$ – критерий Вебера,

d_{cp} – средний диаметр капли, мм;

d_c – диаметр сопла, мм;

$Lp = \frac{\rho_{ж} \sigma d_c}{\mu_{ж}^2}$ – критерий Лапласа;

$\theta_{\Gamma 1} = \theta_{\Gamma}^{0,5}$ – геометрический комплекс, полученный в данной работе;

$\mu_{ж}, \mu_{г}$ – вязкость жидкости и газа, соответственно;

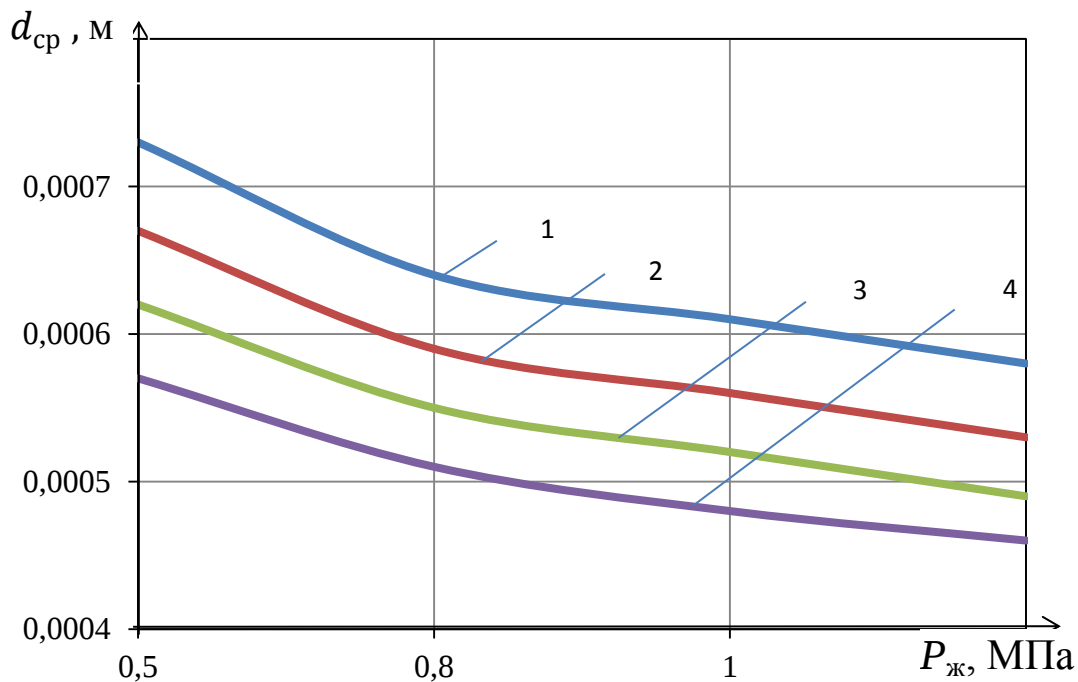
σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Поступательная составляющая скорости выхода воды из сопла, входящая в выражение (2.102), определяется уравнением (2.100).

Следует отметить, что если не учитывать потери кинетической энергии, потраченной на раскручивание центрального потока (учитывать ее как результат сформировавшейся в сопловом канале тангенциальной скорости), а также не учитывать потерю энергии на гидравлический удар, то полученные выражения совпадают с результатами исследований, приведенных в работе [114].

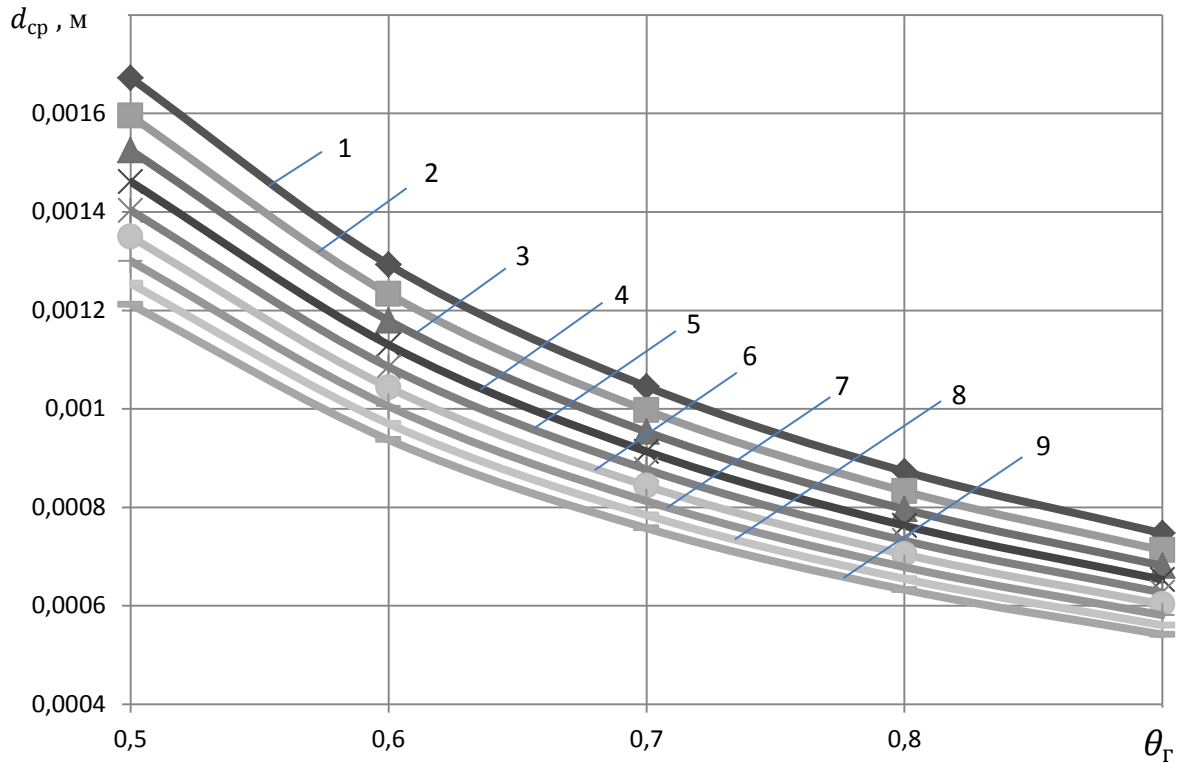
На рисунках 2.12-2.16 представлены результаты численного анализа зависимостей параметров, характеризующих функционирование центробежно-струйного распылителя, от его геометрических размеров и гидравлических параметров противопожарного трубопровода.

Анализ результатов, приведенных на рисунке 2.12, показывает, что, меняя размеры тангенциальных каналов, то есть соотношение скоростей потоков воды в распылителе, и изменяя давление в противопожарном трубопроводе можно получить необходимый диаметр капли.



1 – $\alpha^* = 0,2$; 2 – $\alpha^* = 0,4$; 3 – $\alpha^* = 0,6$; 4 – $\alpha^* = 0,8$

Рисунок 2.12 – Диаметр капель распыленной воды в зависимости от давления в противопожарном трубопроводе $P_{ж}$ и скоростного коэффициента α^*

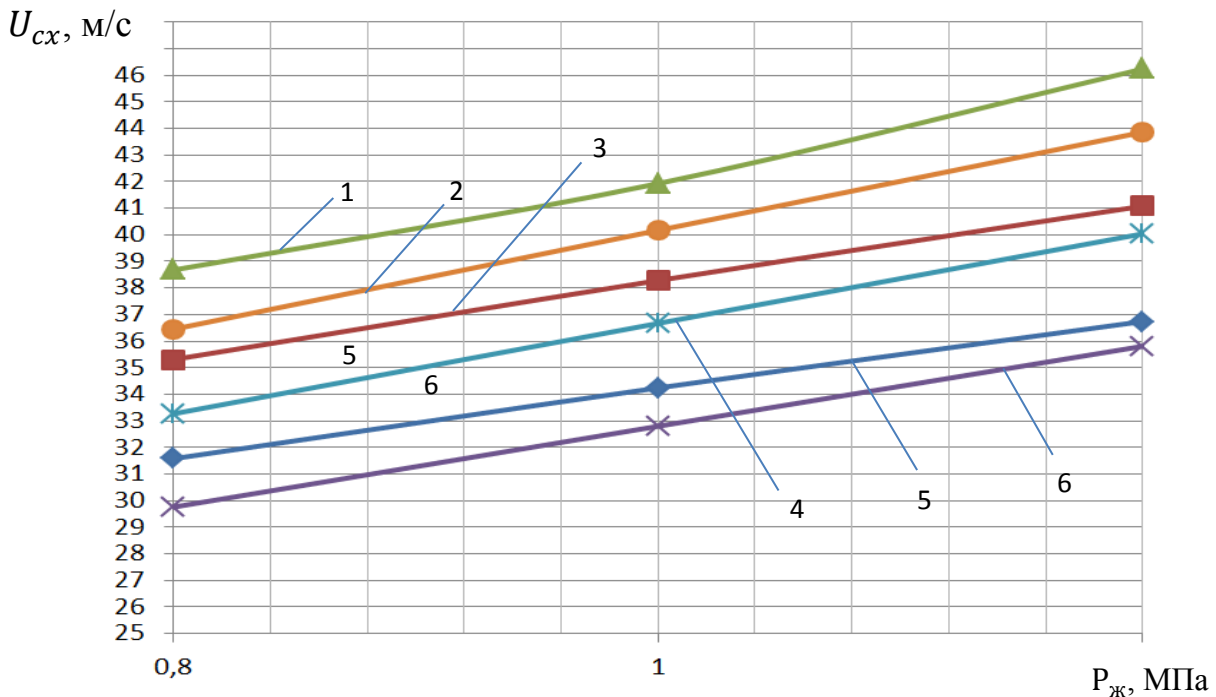


1 – $\gamma_r = 3,2$; 2 – $\gamma_r = 3,4$; 3 – $\gamma_r = 3,6$; 4 – $\gamma_r = 3,8$; 5 – $\gamma_r = 4,0$;
 6 – $\gamma_r = 4,2$; 7 – $\gamma_r = 4,4$; 8 – $\gamma_r = 4,6$; 9 – $\gamma_r = 4,8$

Рисунок 2.13 – Диаметр капель распыленной воды при постоянном давлении в противопожарном трубопроводе в зависимости от геометрического комплекса θ_r для различных соотношений площадей каналов распылителя γ_r

На рисунке 2.13 представлены результаты численного анализа зависимости среднего диаметра капли d_{cp} от соотношения площадей каналов $\gamma_r = \frac{\sum f_r}{f_0}$, постоянном значении давления в противопожарном трубопроводе и геометрического комплекса θ_r , полученного в работе. Анализ полученных результатов указывает на то, что, изменяя соотношение между площадями тангенциальных каналов и центрального канала, можно получить на выходе из сопла капли необходимого диаметра, обеспечивающие охлаждение нагретого газа,

проходящего через водяную завесу, до температуры, безопасной по воспламенению горючих материалов, находящихся в выработке.

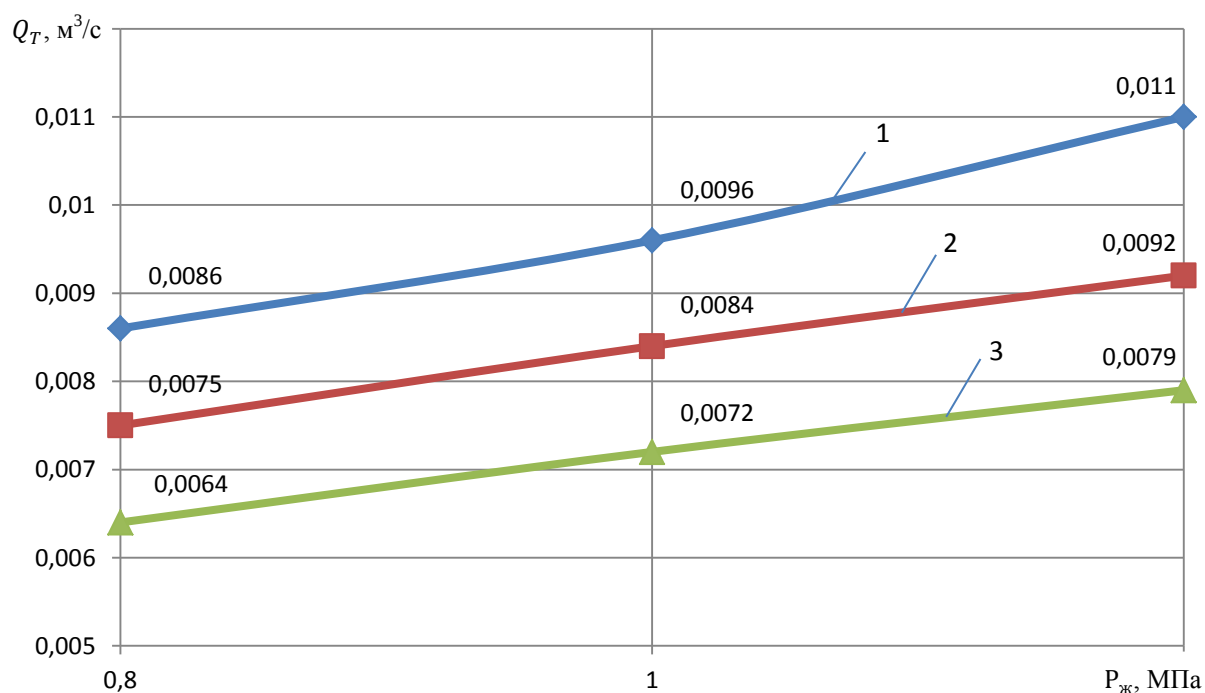


$$1 - \theta_g = 0,5; \quad 3 - \theta_g = 0,7; \quad 5 - \theta_g = 0,9;$$

2, 4, 6 – по формуле Пажи, при значениях $\theta_g = 0,5$ (2), $\theta_g = 0,7$ (4), $\theta_g = 0,9$ (6)

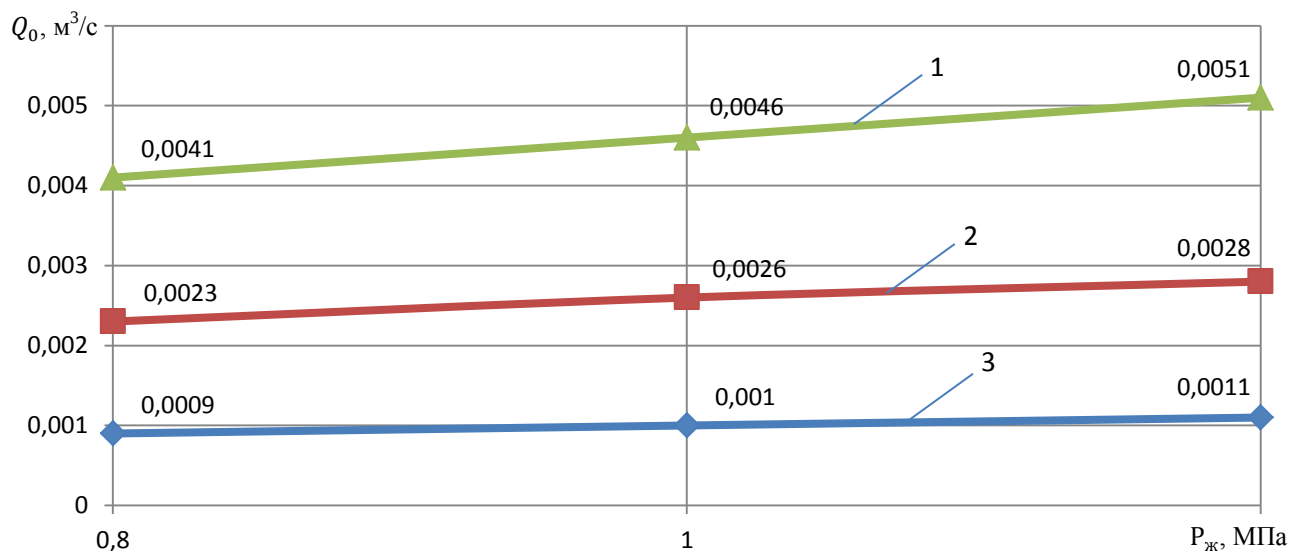
Рисунок 2.14 – Скорость вылета распыленной воды из сопла распылителя в зависимости от давления в противопожарном трубопроводе, при различных значениях геометрического комплекса θ_g

На рисунке 2.14 представлены графики, описывающие зависимость величины поступательной скорости вылета воды из сопла распылителя от давления в противопожарном трубопроводе и геометрического параметра θ_g , полученного в данной работе, и по формуле Пажи (2.101). Полученные аналитические соотношения позволяют оценить расход воды в единицу времени для распылителя с конкретными геометрическими параметрами.



1 – $\alpha=0,2$; 2 – $\alpha=0,5$; 3 – $\alpha=0,9$

Рисунок 2.15 – Объем воды Q_T , $\text{м}^3/\text{с}$, попадающей в камеру смешивания через тангенциальные каналы, в зависимости от давления $P_{\text{ж}}$, МПа, в противопожарном трубопроводе при различных значениях скоростного коэффициента α



1 – $\alpha=0,2$; 2 – $\alpha=0,5$; 3 – $\alpha=0,9$

Рисунок 2.16 – Объем воды Q_o , $\text{м}^3/\text{с}$, попадающей в камеру смешивания через центральный канал, в зависимости от давления $P_{\text{ж}}$, МПа, в противопожарном трубопроводе при различных значениях скоростного коэффициента α

На рисунке 2.15-2.16 приведены графики, характеризующие соотношения между объемами воды, попадающей в камеру смешивания через центральный и тангенциальные каналы, в зависимости от скоростных коэффициентов и давления в противопожарном трубопроводе.

Приведенные результаты позволяют определить геометрические параметры распылителя, обеспечивающие его функционирование как центробежно-струйного распылителя.

Таким образом анализ полученных результатов подтверждает тот факт, что диаметр капли, скорость ее вылета, угол раскрытия факела, соотношение между количествами воды, попадающей в камеру смешивания через центральный и тангенциальные каналы, зависят как от давления в подводящем трубопроводе, так и от геометрических размеров распылителя. Это позволило выбрать геометрические размеры распылителя, давление в противопожарном трубопроводе, обеспечивающие необходимый диаметр капель водяной завесы.

Полученные решения позволили определить максимальное число распылителей, работу которых может обеспечить противопожарный трубопровод при заданном в нем давлении воды.

Скорость воды $V_{\text{тр}}$, м/с, в подающем трубопроводе определяется соотношением [115]

$$V_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{2P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}}. \quad (2.103)$$

Тогда количество воды $q_{\text{ор}}$, м³/с, поступающее в распылитель в единицу времени

$$q_{\text{ор}} = \pi \sqrt{\frac{2P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}} R_{\text{тр}}^2, \quad (2.104)$$

где $R_{\text{тр}}$ – радиус подводящего противопожарного трубопровода, м.

Количество воды q_1 , кг/с, попадающей в камеру смешивания распылителя в единицу времени, рассчитываем с помощью построенного решения по формуле

$$q_1 = \pi f_c U_{cx}. \quad (2.105)$$

Тогда максимальное число n_{max} эффективно функционирующих распылителей определяем из соотношения

$$n_{max} = \left[\frac{q_{op}}{q_1} \right]. \quad (2.106)$$

Здесь $\left[\frac{q_{op}}{q_1} \right]$ – антье – функция.

Получена математическая модель гидродинамических процессов в распылителе, учитывающая потери кинетической энергии потоков воды при входе ее в камеру смешивания из-за гидравлического удара и раскручивания центрального потока. При разработке математической модели нами введены скоростные коэффициенты $\alpha_*^{(1)}$ и α_* , учитывающие конструктивные особенности рассмотренного распылителя. Наличие вкладыша в виде усеченного конуса приводит к тому, что скорость входа тангенциального потока в камеру смешивания в несколько раз превосходит скорость входа центрального потока. Это позволяет раскручивать центральный поток в камере смешивания, при этом распылитель функционирует как центробежно-струйный, обеспечивая угол раскрытия факела до 90 град, с практически равномерным распределением капель воды необходимого диаметра.

Выводы к разделу 2

1. Исследован процесс испарения капли воды в водяной завесе под влиянием теплоты газового потока, поступающего из зоны пожара. При этом учтено, что температура газового потока вдоль водяной завесы понижается от температуры пожарных газов на входе в завесу $T_{гк}$ до безопасной величины $T_{восп}$. Определено время полного испарения капли воды, движущейся в газовом потоке вдоль горной выработки.

2. Полученные зависимости траекторий полета испаряющихся капель в пространстве, ограниченном поверхностью горной выработки, от места расположения распылителей и их параметров дают возможность обосновать рациональное размещение распылителей в сечении выработки, обеспечивающее оптимальный отбор тепла из нагретого газового потока.

3. На базе построенного аналитического решения пространственной задачи о движении испаряющейся капли в нагретом газовом потоке разработан алгоритм оценки доли подаваемой в выработку распыленной воды, участвующей в охлаждении газа, что позволило определить общий объем воды, которую необходимо подавать к распылителям для обеспечения снижения температуры в выработке до безопасной величины.

4. Исследовано движение воды в центробежно-струйном распылителе с усеченным конусоидальным вкладышем. С помощью математической модели, учитывающей перераспределение кинетической энергии тангенциального и центрального потоков при попадании их в камеру смешивания, установлены зависимости диаметра капли, скорости их вылета и угла раскрытия факела от геометрических параметров распылителя и гидравлических характеристик противопожарного трубопровода.

5. При построении математической модели введены скоростные коэффициенты, учитывающие конструктивные особенности центробежно-струйного распылителя. Скорость входа тангенциального потока в камеру смешивания в несколько раз превосходит скорость входа центрального потока, что обеспечивает раскручивание центрального потока в камере смешивания, при этом распылитель

функционирует как центробежно-струйный, формируя факела с углом раскрытия до 90 град, с равномерным распределением в нем капель воды. Это позволяет с помощью варьирования площади сечения центрального, тангенциального и соплового каналов и угла конусности вкладыша добиться необходимых значений среднего диаметра капли, скорости ее вылета и угла раскрытия факела завесы для конкретных выработок и значений давления в противопожарном трубопроводе.

6. Получены аналитические выражения для определения количества распылителей, функционирование которых может обеспечиваться при определенном давлении в противопожарном трубопроводе, что позволяет разработать необходимые требования к конструкции систем эффективной локализации пожаров.

7. На основании результатов исследований баллистики испаряющейся капли получена зависимость для определения дальности полета капель распыленной воды, вылетающих из центробежно-струйного распылителя и движущихся в нагретом газовом потоке, что позволило обосновать оптимальную глубину водяной завесы и определить интервал расстановки распылителей по длине выработки, обеспечивающий снижение температуры за завесой до безопасной величины.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРА МЕЛКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

3.1. Методика проведения экспериментальных исследований

Цель первого этапа экспериментальных исследований было определение расхода воды разработанного центробежно-струйного распылителя РВ-10.

Испытания центробежно-струйных распылителей РВ-10 проводили в соответствии с требованиями ДСТУ EN 12259-1:2008 «Стационарные системы пожаротушения. Элементы спринклерных и водораспыливающих систем. Часть 1. Спринклеры» по «Методике испытаний по определению коэффициента расхода распылителей».

Схема испытательного стенда для определения коэффициента расхода распылителя РВ-10 приведена на рисунке 3.1.

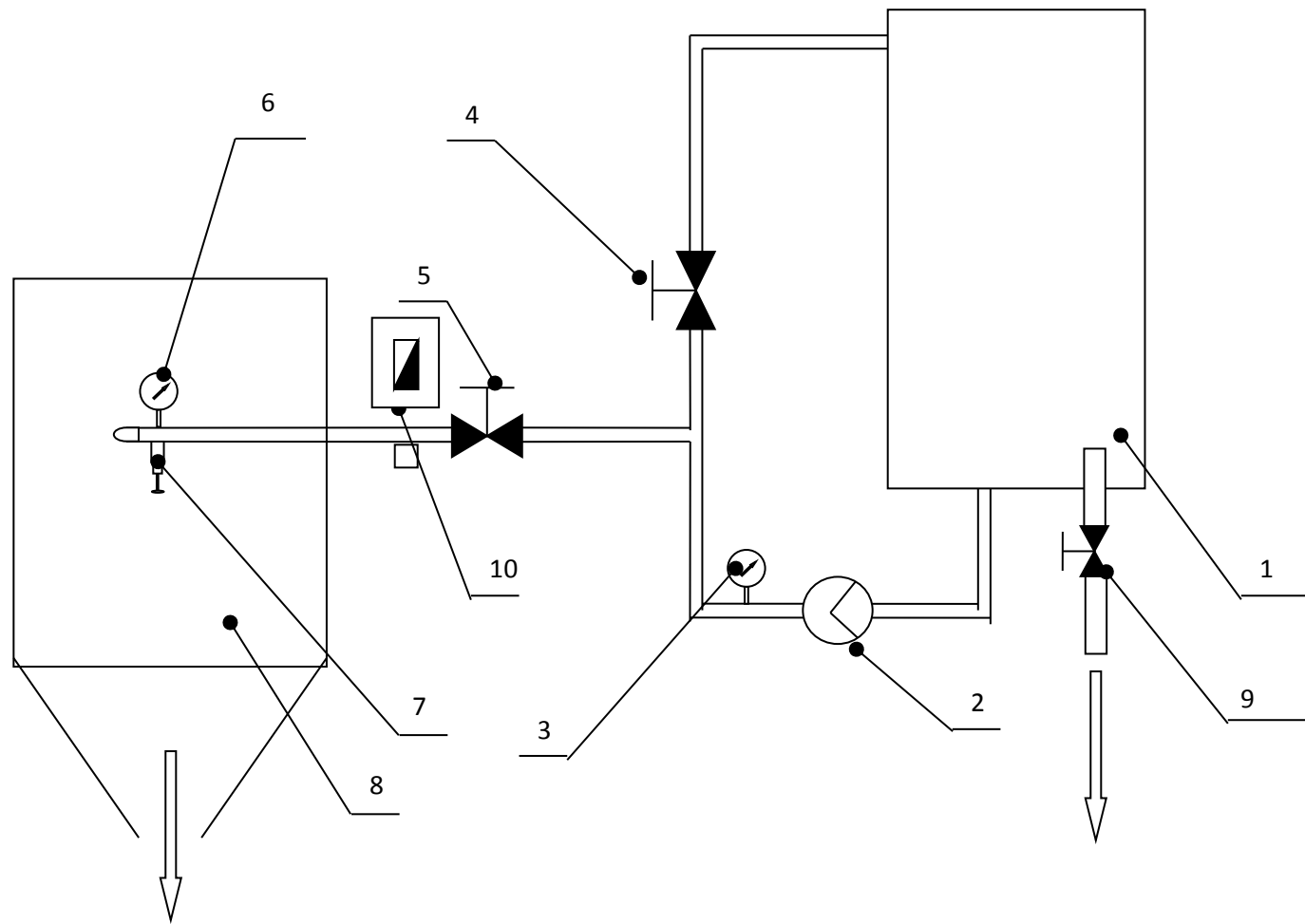
Из бака 1 вода по трубопроводу подается к насосу 2, далее в разветвление по направлению на распылитель и обратный слив, на участке обратного слива размещается вентиль для регулирования в системе заданного давления и расхода воды через центробежно-струйный распылитель 7, на другой ветви трубопровода размещены вентиль 5 для регулирования подачи воды в трубопровод, а за вентилем вмонтирован расходомер 10 для измерения расходов воды и манометр 6 для контроля давления перед распылителем РВ-10.

Метод испытаний состоял в определении расхода воды прямым измерением объема воды, подаваемой из распылителя.

Испытания проводили следующим образом.

1. Включали насос и измеряли расход воды из распылителя под давлением от $(0,06 \pm 0,03)$ МПа до $(0,66 \pm 0,03)$ МПа с интервалом $(0,10 \pm 0,03)$ МПа.

2. Измерения расходов воды при каждом значении давления проводили в течении промежутка времени не менее 60 с.



1 – бак; 2 – насос; 3,6 – манометр; 4,5 – вентиль; 7 – распылитель РВ-10; 8 – испытательная камера;
9 – сливной кран; 10 – расходомер

Рисунок 3.1 – Схема испытательного стенда для определения коэффициента расхода распылителя

3. Для каждого значения давления P_i , Па, рассчитывали коэффициент расхода K_i (К-фактор) по формуле

$$K_i = \frac{Q_i}{\sqrt{P_i}}, \quad (3.1)$$

где Q_i – расход воды, м³/с.

4. Рассчитывали среднее значение коэффициента расхода распылителя в каждой серии испытаний по формуле

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (3.2)$$

где n – число испытаний в серии.

5. Испытания проводили при следующих климатических условиях:

- температура окружающей среды – (25 ± 10) °С;
- относительная влажность окружающей среды – (65 ± 15) %;
- атмосферное давление – (765 ± 10) мм. рт. ст.

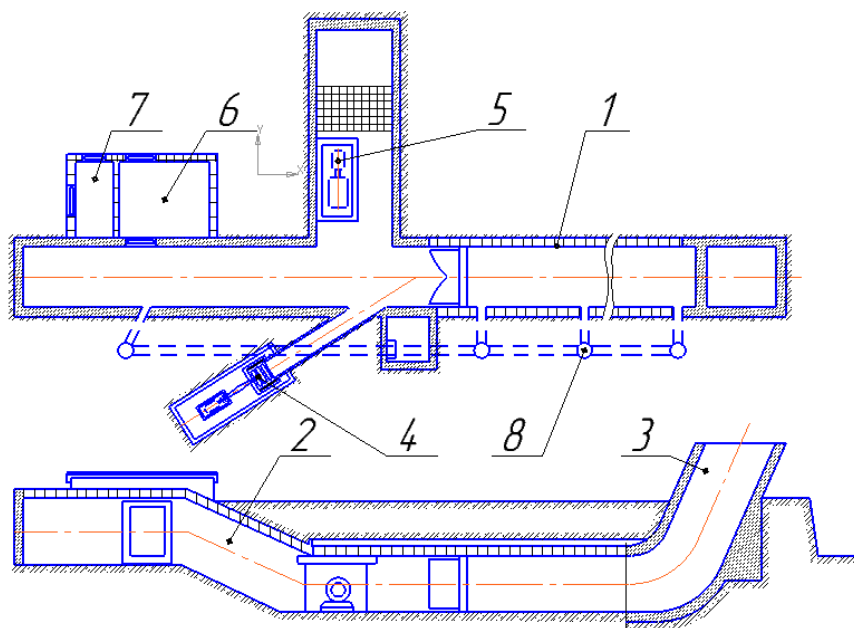
Использованные в испытаниях средства измерительной техники представлены в таблице 3.1.

Целью второго этапа экспериментальных исследований была проверка соответствия результатов аналитических исследований процессов движения и распределения капель мелкораспыленной воды параметрам реальных процессов распределения воды в горной выработке, а также выбор рационального размещения распылителей в сечении выработки.

Второй этап исследований проводили на экспериментальной штольне НИИГД «Респиратор» (рисунок 3.2).

Таблица 3.1 – Перечень средств испытаний и измерений

Наименование и тип средства	Пределы измерений	Метрологические характеристики средства измерения	Нормативный документ на средство измерения
Стенд по определению коэффициента расхода распылителей ВСК	от $(0,06 \pm 0,03)$ МПа до $(0,66 \pm 0,03)$ МПа	$\pm 0,03$	Паспорт ВСК
Расходомер VA 2301	от $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $60 \text{ м}^3/\text{ч}$	$\pm 0,5 \%$	
Датчик давления Kobold SEN-3251 B085.3251.076.092	от 6 бар до 16 бар	$\pm 0,25 \%$	
Миллиамперметр M2020 22117	от 0 мА до 60 мА	$\pm 0,2 \%$	
Психрометр асинхронный МВ-4М	от $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ от 10 % до 100 % при температуре от $5 \text{ }^\circ\text{C}$ до $40 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,2 \%$ $\pm 4 \%$	ТУ 25-1607-54-88
Барометр-анероид Типа М-67	$(600-800)$ мм. рт. ст.	± 1 мм. рт. ст.	ТУ 25-04-1797-75
Секундомер	0–3600 с	2 класс точности	ТУ 5072



1 – горизонтальная выработка; 2 – наклонный выход на поверхность; 3 – диффузор;
 4 – вентиляторная установка; 5 – насос; 6 – электрораспределительный пункт;
 7 – помещение для измерительной аппаратуры; 8 – измерительные станции

Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной штольни

Эксперименты проводили для определения:

- количества воды, транспортируемой вентиляционным потоком на различные расстояния от распылителей;
- количества воды, выпадающей на почву штольни;
- количества воды, оседающей на кровлю и боковые стенки штольни;
- коэффициента распределения воды;
- рациональной расстановки распылителей по сечению выработки.

Измеряли следующие параметры:

- давление, создаваемое насосной установкой при распылении воды;
- объемный расход воды через распылители;
- время работы распылителей;
- объем воды, набранной в ловушки, установленные на телескопической раме и на почве штольни;
- скорость вентиляционного потока в штольне;
- температуру вентиляционного потока.

Штольня представляет собой прямую подземную выработку, пройденную по наносному грунту на глубине 2,2 м от поверхности.

Штольня (рисунок 3.2) состоит из горизонтальной выработки 1 длиной 187 м, наклонного выхода на поверхность 2, диффузора 3, камеры вентиляторной установки 4, насосной камеры с водосборником 5, электрораспределительного пункта 6 и помещения для измерительной аппаратуры 7.

Поперечное сечение горизонтального участка до установки в нем деревянной крепи (вчерне) – 10 м^2 , после установки (в свету) – 9 м^2 .

Вентиляторная установка, предназначенная для нагнетания свежего воздуха в штольню, состоит из вентилятора ВМ-6. Она оборудована шиберным устройством, позволяющим изменять скорость вентиляционной струи от 0,6 до 2 м/с. Вход в камеру вентиляторной установки закрывается специальной падающей металлической лядой с фиксирующим устройством.

Насосная установка, предназначенная для откачки грунтовых вод, состоит из электродвигателя и насоса.

Электроснабжение штольни осуществлялось от поверхностной электроподстанции мощностью $S = 180 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, оборудованной рядом с лабораторным корпусом.

По всей длине рабочего участка штольни устроены 23 измерительные станции (колодцы) 8, соединенные керамическими трубками с горизонтальным участком, между собой и с помещением для измерительной аппаратуры.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.3.

Насосную установку (насос 9МГР61 и электродвигатель) располагали в подвальном помещении лабораторного корпуса. Воду под давлением подавали по трубопроводу или пожарному рукаву в штольню к распылителям. Давление, создаваемое насосной установкой, измеряли при помощи образцового манометра. Объемный расход воды измеряли с помощью водяного счетчика ВСКМ, порог чувствительности которого не превышал $0,020 \text{ м}^3/\text{час}$. Время экспериментов измеряли с помощью секундомера.

Коллектор с распылителями закрепляли на специальной распорной стойке. Мелкораспыленная вода подхватывалась потоком воздуха, создаваемым вентилятором, и транспортировалась по штольне, попадая в специальные ловушки, расположенные на телескопической раме и на почве штольни.

Всего на коллекторе размещали пять распылителей, каждый из которых открывали с помощью крана независимо от остальных. Расположение распылителей в сечении определяли координатами «а» - по ширине и «с» - по высоте штольни.

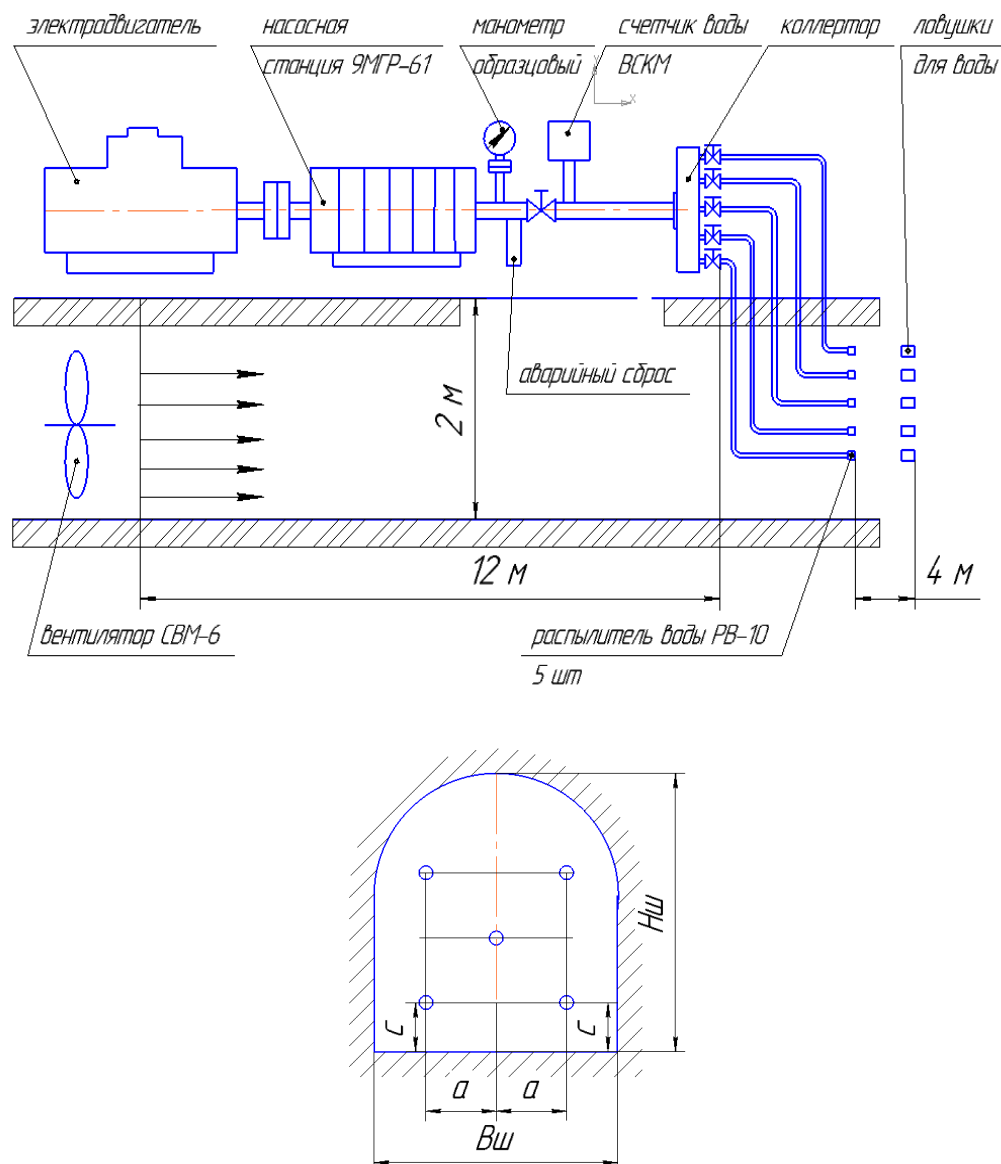


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка для исследования распределения мелкораспыленной воды

Ловушки были изготовлены из жести ($d = 0,2$ мм). Ловушка состояла из корпуса и резервуара емкостью 130 см^3 (рисунок 3.4). На телескопической раме размещали 20 ловушек с 1 номера по 20 (рисунок 3.5). Количество воды, выпавшей на почву, измеряли ловушками, закрепленными на специальной раме (рисунок 3.6), которая располагалась под переносной телескопической рамой. Емкость ловушек 135 см^3 , количество – 7 шт., с 21-го номера по 27-й.

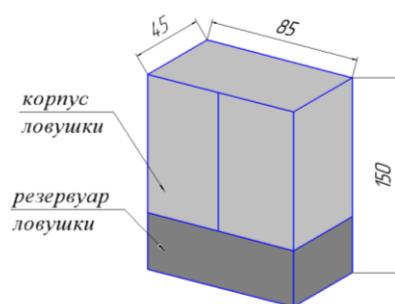


Рисунок 3.4 – Ловушка для транспортируемых капель

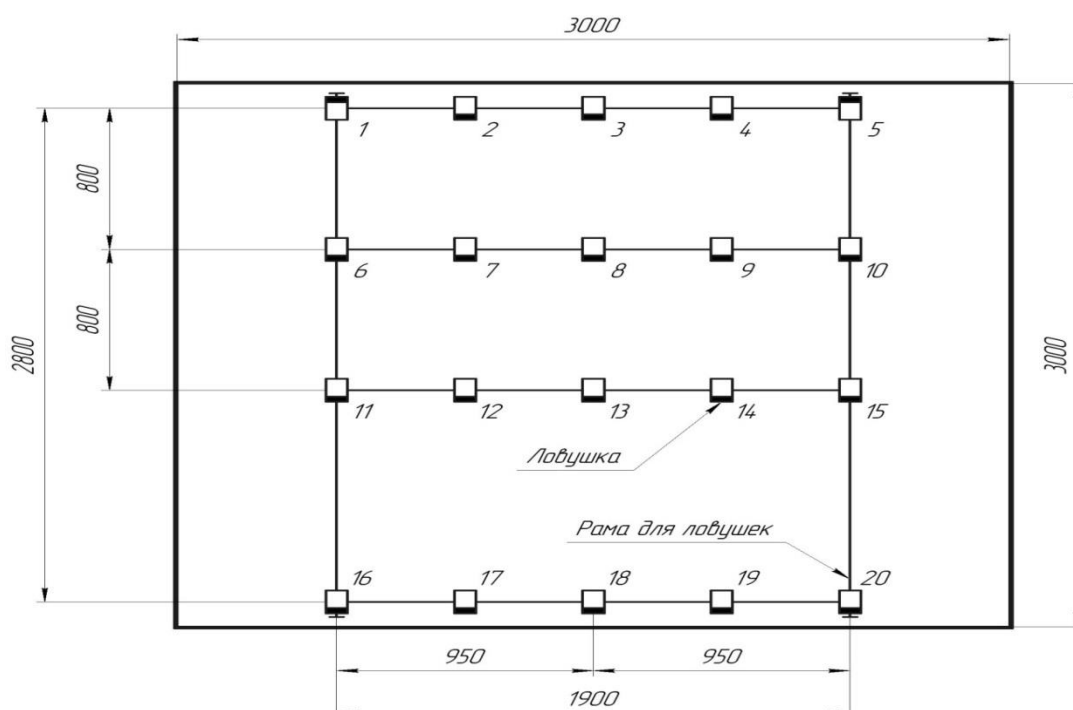


Рисунок 3.5 – Телескопическая рама с ловушками в сечении штольни

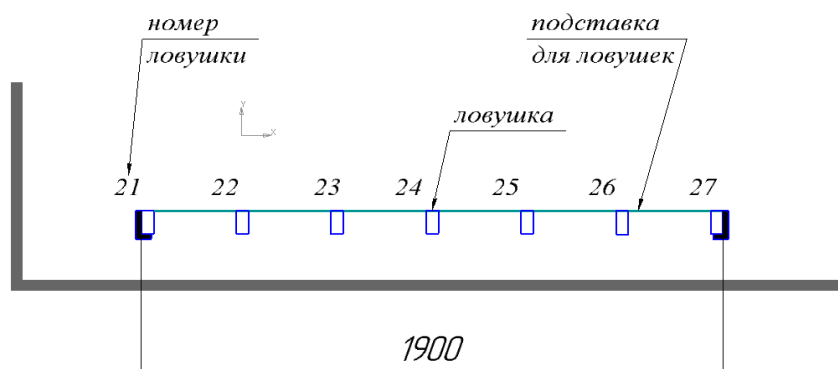


Рисунок 3.6 – Рама с ловушками для выпадающей на почву воды

Скорость потока воздуха в штольне устанавливали равной – 1 м/с. Скорость измеряли анемометром АСО-3.

Для измерения температуры воздуха, поступающего в штольню, использовали технические термометры.

В экспериментах использовали разработанные и испытанные центробежно-струйные распылители РВ-10 (рисунок 3.7).

Распылитель образует факел в виде равномерно заполненного конуса мелкораспыленной воды с диаметром капель 0,3 мм при давлении перед распылителем 0,6 МПа. Угол раскрытия факела – 90 град, условный проход сопла распылителя – 10,0 мм, расход воды 5,7 м³/ч.



Рисунок 3.7 – Центробежно-струйный распылитель РВ-10.

Количество воды, транспортируемой вентиляционным потоком и выпадающей на почву выработки, определяли в зависимости от следующих параметров:

- давления воды на входе в распылитель – 0,5 МПа;
- скорости вентиляционного потока – 1 м/с;
- количества работающих распылителей (1 шт. и 5 шт.);

– расстояния от места установки распылителей.

Порядок проведения экспериментов:

– открывали необходимое число распылителей;

– раму с ловушками ставили в определенном сечении штольни и в этом же сечении ставили ловушки для измерения количества выпадающей на почву воды;

– устанавливали нужный вентиляционный режим;

– включали водяной насос и устанавливали нужное давление;

– в момент окончания набора воды ловушками выключали насос и вентилятор.

Расчетное значение объема мелкораспыленной воды, проходящей в единицу времени через начальное сечение (в месте размещения коллектора с распылителями, в 12 м от вентилятора)

$$Q_{\text{во}} = n_p q_p, \quad (3.3)$$

где n_p – количество используемых в эксперименте распылителей.

Объем воды, проходящей в единицу времени через сечение, в котором установлены ловушки, определяли из соотношения

$$Q_{\text{в}} = \frac{S_{\text{в}} \sum_{i=1}^n v_i}{n S_{\text{лов}} \tau}, \quad (3.4)$$

где $S_{\text{в}}$ – площадь сечения штольни, м^2 ;

v_i – объем воды в i -й ловушке, м^3 ;

n – число ловушек в штольне ($n = 20$);

$S_{\text{лов}}$ – площадь входного сечения ловушки, м^2 .

При $S_{\text{в}} = 9 \text{ м}^2$; $S_{\text{лов}} = 64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $n = 20$, имеем расчетную зависимость

$$Q_{\text{в}} = \frac{9 \sum_{i=1}^n v_i}{20 \cdot 64 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} = 70,31 \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{\tau}. \quad (3.5)$$

Объем воды $Q_{\text{вп}}$, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}$, выпадающей на единицу длины почвы штольни, определяли из соотношения

$$Q_{\text{вп}} = \frac{S_n \sum_{i=1}^{n_n} v_i}{n_n S_{\text{лов}} \tau b}, \quad (3.6)$$

где n_n – число ловушек на почве ($n_n = 7$);

$S_n = bL_p$ – площадь участка почвы, на котором производятся замеры, м^2 ;

L_p – ширина рамы с ловушками, м;

b – длина измеряемого слоя выпавшей воды, м.

При $b = 0,08$ м; $n_n = 7$, получаем

$$Q_{\text{вп}} = 42,4 \frac{\sum_{i=1}^{n_n=7} v_i}{\tau}. \quad (3.7)$$

Объем мелкораспыленной воды $Q_{\text{вбк}}$, $\text{м}^3/\text{с}$, осевшей на боковые стенки и кровлю участка штольни длиной L , м, определяли по зависимости

$$Q_{\text{вбк}} = Q_{\text{во}} - Q_{\text{в}} - Q_{\text{вп}}L. \quad (3.8)$$

Коэффициент распределения воды K_p , то есть долю воды, транспортируемой потоком, определяли из соотношения

$$K_p = \frac{Q - Q_{\text{ж}}}{Q}. \quad (3.9)$$

При локализации пожара именно эта часть воды испаряется и охлаждает поток пожарных газов.

Вначале определяли рациональное размещение распылителей по сечению штольни. Включали поочередно распылители ($n_p = 1$; $n_p = 5$) и производили измерения и расчеты.

Коэффициент распределения воды K_p увеличивался с ростом давления на входе в распылитель. По мере увеличения координаты «а» коэффициент распределения воды снижался, то есть большее количество воды оседало на боковых стенках выработки. Наибольшее значение коэффициента распределения воды K_p достигнуто при расположении распылителя в точке с координатами «а»=0 и «с»=1,5 м.

Таким образом, размещение распылителей должно отвечать следующим условиям:

- распылители должны располагаться в выработках таким образом, чтобы каждый распылитель находился от стенок (кровли) выработки на расстоянии не менее 0,5 м;

- свободное распределение распылителей в установке, то есть должна быть обеспечена возможность уменьшения или увеличения расстояния между распылителями и поверхностью защищаемой выработки;

- при расположении распылителей в установке, как показано на рисунке 3.3, координаты их размещения должны отвечать условиям

$$a < \frac{B_{ш}-1}{2}; c < \frac{H_{ш}-1}{3}, \quad (3.10)$$

где $B_{ш}$, $H_{ш}$ – соответственно, ширина и высота штольни, м.

Целью третьего этапа экспериментальных исследований была проверка соответствия результатов теоретических исследований параметрам реального пожара и процесса его локализации в горной выработке.

Схема огневого эксперимента представлена на рисунке 3.8. В огневой части штольни устанавливали деревянную крепь из неполных дверных окладов (крепежных рам), бока и кровлю затягивали обаполами толщиной (2-3) см. Диаметр стоек и верхняков (14-16) см, расстояние между крепежными рамами (0,75-0,8) м. Каждую раму расклинивали. Сечение выработки в свету после закрепления деревянной крепью составляло 9 м². Пожарная нагрузка по древесине крепи

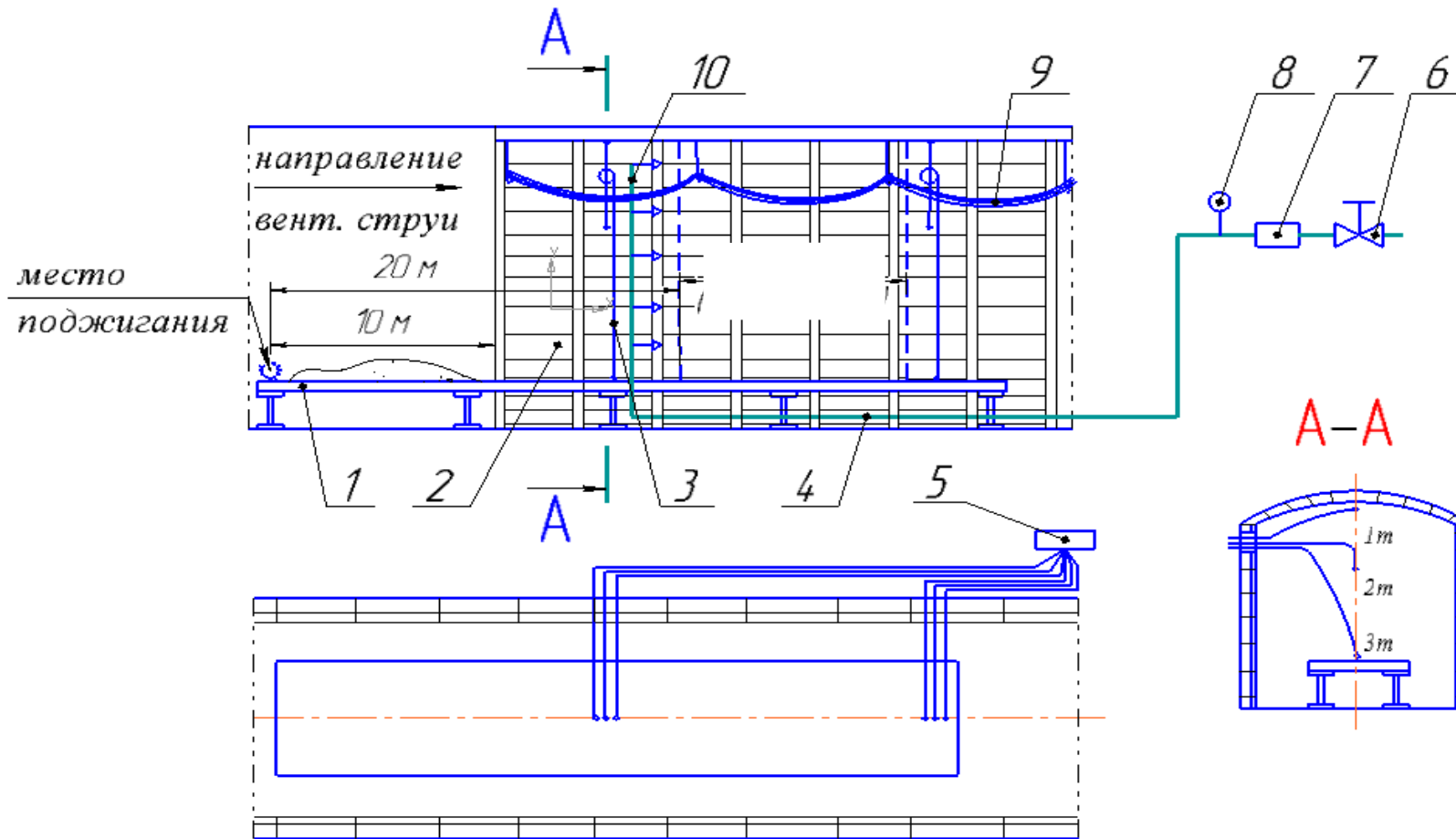
колебалась от 90 до 140 кг на 1 м длины закрепленного участка выработки. Средняя влажность крепи в штольне колебалась от 13,3 до 36,8%.

Водяную завесу создавали с помощью конструкции, имитирующей установку локализации пожаров (см. рисунок 3.3), с использованием центробежно-струйных распылителей, размещенных в соответствии с результатами второго этапа испытаний, представленных в разделе 3.2. Воду распыляли по направлению потока пожарных газов. Водяную завесу размещали по длине штольни таким образом, что с обеих сторон завесы оставались участки, закрепленные деревянной затяжкой, но не орошаемые мелкораспыленной водой. Участок деревянной затяжки, расположенный за водяной завесой, являлся контрольным и служил для подтверждения факта: загорелась или нет пожарная нагрузка, расположенная по ходу вентиляционной струи за завесой.

Для измерения температуры воздуха до водяной завесы и за ней при пожаре в штольне использовали термопары типа ТХА по ГОСТ 6616-74, соединенные проводами с автоматическим потенциометром КСП-4 по ГОСТ 7164-78. Три термопары располагали перед завесой и три – после завесы. При этом одну термопару расположили вверху штольни (на 0,2 м ниже кровли), вторую – посередине высоты штольни, третью – у поверхности конвейерной ленты. Потенциометр 5, вентиль 6, счетчик холодной воды 7 и манометр 8 (рисунок 3.8) располагали на поверхности штольни.

Конвейерную ленту поджигали по всей ширине ленты одновременно на длине (0,08...0,1) м, после чего дальнейшее горение и распространение пожара по поверхности ленты происходило за счет свободного горения.

Чтобы вызвать загорание крепи (при отсутствии ленты) поджигали костры, сложенные из (50-60) кг дров (затяжки). Костры обливали керосином (1-1,5) л, трансформаторным маслом либо поджигали без добавления горючей жидкости.



1 – резинокросовая конвейерная лента; 2 – затяжка деревянная; 3 – термопара; 4 – пожарный трубопровод; 5 – потенциометр КСП-4; 6 – вентиль; 7 – счетчик холодной воды; 8 – манометр; 9 – кабель; 10 – установка локализации

Рисунок 3.8 – Схема огневого эксперимента

Для имитации срабатывания установки локализации, ее включали вручную с помощью вентиля 6 в момент, когда верхняя термopapa, расположенная перед установкой, показывала на потенциометре 5 температуру 90 °C (рисунок 3.8). Температуры, измеряемые всеми шестью термopapaми, записывали на ленту потенциометра КСП-4.

Эксперименты проводили при двух значениях производительности вентилятора: 270 м³/мин и 540 м³/мин, что соответствовало скоростям вентиляционного потока 1,0 м/с и 2,0 м/с. Скорости потока воздуха в штольне измеряли с помощью чашечного анемометра АСО-3.

При максимальном количестве используемых в экспериментах распылителей ($n_p=5$) общий расход воды, необходимый для охлаждения пожарных газов при давлении 0,6 МПа составил $Q_v = 28,5$ м³/ч.

Этот расход при подготовке эксперимента определяли при помощи счетчика воды и секундомера.

Расчетные значения температуры потока пожарных газов на входе в водяную завесу ($T_{гк}^*$, °C) и на выходе из нее ($T_{г}^*$, °C) в зависимости от количества и вида пожарной нагрузки в штольне определяли согласно [10].

В экспериментах были использованы следующие варианты пожарной нагрузки (таблица 3.2).

Если при определенных значениях пожарной нагрузки, скорости вентиляционного потока и числе распылителей рассчитанное значение температуры после завесы заведомо превышало допустимую величину

$$T_{г}^* > T_{доп}, \quad (3.11)$$

то эксперимент при данном количестве распылителей не проводился, а их число увеличивали.

Таблица 3.2 – Вид и количество пожарной нагрузки

Вид пожарной нагрузки	Количество пожарной нагрузки, кг	
	Эксперимент	
	I	II
Деревянная крепь и затяжка	130	130
Конвейерная резинотросовая лента шириной 0,6 м	13,2	–
Уголь на конвейерной ленте	25,9	–
Деревянные трапы	15	–
Кабели	30	–

Аналогично поступали если при каком-то значении n_p условие (3.11) уже выполнялось, то есть дальнейшего увеличения расхода воды на локализацию не требовалось.

Средние температуры пожарных газов до и после завесы рассчитывали по результатам измерений в соответствии с формулами

$$\bar{T}_{ГК} = \frac{T_{ГК1} + T_{ГК2} + T_{ГК3}}{3}, \quad (3.12)$$

$$\bar{T}_Г = \frac{T_{Г1} + T_{Г2} + T_{Г3}}{3}, \quad (3.13)$$

где $T_{ГКі}$, $T_{Гі}$ – температуры в i -й точке ($i=1, 2, 3$), измеряемые при помощи термопар.

3.2 Исследование расходной характеристики центробежно-струйного распылителя

Результаты испытаний центробежно-струйного распылителя представлены в таблице 3.3. и на рисунке 3.9.

С большой степенью точности (коэффициент корреляции $R^2=0,9613$) расходную характеристику центробежно-струйного распылителя РВ-10 можно описать следующей эмпирической зависимостью

$$Q_v = 51,359P^{0,3837} \quad (3.15)$$

где $[Q_v]$ – л/мин, $[P]$ – МПа.

Таблица 3.3 – Результаты испытаний центробежно-струйного распылителя РВ-10

P , МПа	Образец №1		Образец №2	
	Расход, Q_v , л/мин	K-faktor	Расход, Q_v , л/мин	K-faktor
1	2	3	4	5
0,05	38,8	54,87	41,2	58,27
0,15	62,0	50,62	60,2	49,15
0,25	68,2	43,13	75,2	47,56
0,3	73,0	42,15	83,0	47,92
0,35	76,5	40,89	88,0	47,04
0,4	84,2	39,69	96,2	45,35
0,5	87,5	39,13	101,5	45,39
0,55	91,0	38,80	104,4	44,52
0,6	95,0	38,78	107,5	43,89
0,65	98,4	38,60	112,0	43,93
0,75	105,4	38,49	118,2	43,16
0,8	107,2	37,90	121,4	42,92
0,85	110,5	37,90	124,2	42,60
0,9	113,2	37,73	127,9	42,63
0,95	116,0	37,64	130,2	42,24
1,00	118,5	37,47	132,7	41,96
1,05	121,0	37,34	135,4	41,79
1,15	125,7	37,07	140,4	41,40
		40,46		45,10

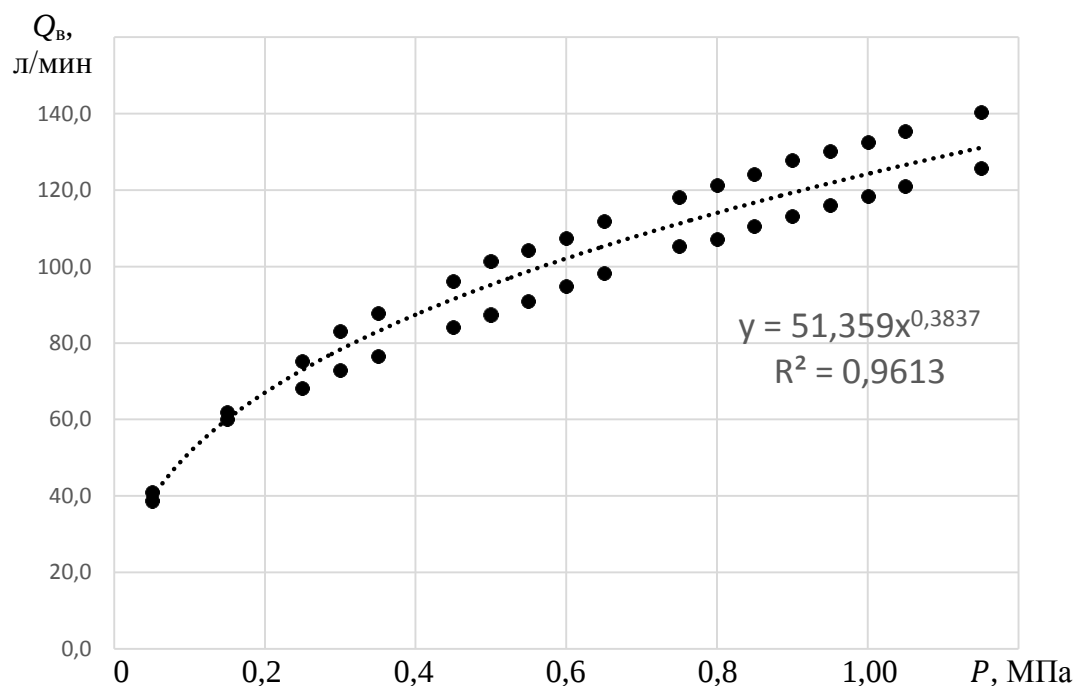


Рисунок 3.9 – Расходная характеристика центробежно-струйного распылителя РВ-10

3.3 Исследование распределения мелкораспыленной воды в горной выработке

Данные экспериментов по распределению капель мелкораспыленной воды в горной выработке представлены в таблицах 3.4-3.5 и на рисунке 3.10.

Адекватность результатов модели процесса движения мелкораспыленной воды в горной выработке подтверждается достаточно близкой сходимостью значений коэффициента распределения воды K_p полученных в экспериментальных исследованиях и рассчитанных по математической модели. Ошибка не превышала 13,04 %.

Таблица 3.4 – Значение коэффициента распределения K_p при различном расположении распылителя

Давление на входе в распылитель, ΔP , МПа	Угол раскрытия факела, β , град $^{\circ}$	$Q_{\text{во}}$, м 3 /ч	$Q_{\text{в}}$, м 3 /ч	$Q_{\text{вп}}$, м 3 /ч	$Q_{\text{вбк}}$, м 3 /ч	Коэффициент распределения		
						$K_{\text{р эксп.}}$	$K_{\text{р теор.}}$	$\Delta K\%$
Количество распылителей: $n_{\text{р}} = 1$ Расположение распылителя: $a = 0$, $c = 1,5$ м								
0,6	25	5,7	4,50	0,85	0,35	0,79	0,83	5,06
	30		4,05	1,03	0,62	0,71	0,74	4,22
	35		3,93	0,86	0,91	0,69	0,66	4,35
	40		3,19	1,48	1,03	0,56	0,60	7,14
	45		3,36	1,20	1,14	0,59	0,56	5,36
Количество распылителей: $n_{\text{р}} = 1$ Расположение распылителя: $a = 1$; $c = 1,5$								
0,6	25	5,7	3,65	0,91	1,14	0,64	0,73	13,04
	30		3,31	1,14	1,25	0,58	0,65	12,07
	35		3,42	0,91	1,37	0,60	0,57	5,00
	40		2,62	1,14	1,94	0,46	0,51	10,87
	45		2,79	1,37	1,54	0,49	0,47	4,08

Таблица 3.5 – Значение коэффициента распределения воды K_p при одновременной работе пяти распылителей

Давление воды перед установкой, ΔP , МПа	V_0 , м/с	$Q_{во}$, м ³ /ч	$Q_{в}$, м ³ /ч	$Q_{вп}$, м ³ /ч	$Q_{вбк}$, м ³ /ч	K_p
Скорость вентиляционного потока $V=1,0$ м/с						
0,4	6,9	3,87	2,05	1,44	0,38	0,53
0,5	7,8	4,26	2,39	1,39	0,48	0,56
0,6	8,5	4,63	2,96	1,17	0,49	0,64
0,7	9,2	4,94	3,50	0,86	0,58	0,71
0,8	9,8	5,24	4,04	0,53	0,67	0,77
Скорость вентиляционного потока $V=2,0$ м/с						
0,4	6,9	3,87	2,17	1,36	0,34	0,56
0,5	7,8	4,26	2,60	1,24	0,42	0,61
0,6	8,5	4,63	3,10	1,00	0,53	0,67
0,7	9,2	4,94	3,60	0,66	0,67	0,73
0,8	9,8	5,24	4,24	0,32	0,68	0,81

Коэффициент распределения воды K_p возрастал с увеличением давления на входе в распылитель, то есть с ростом скорости вылета капель.

С увеличением скорости вентиляционного потока коэффициент распределения воды K_p увеличивался, то есть капли дольше оставались в потоке, не осаждаясь на поверхность, и испарялись, снижая температуру пожарных газов.

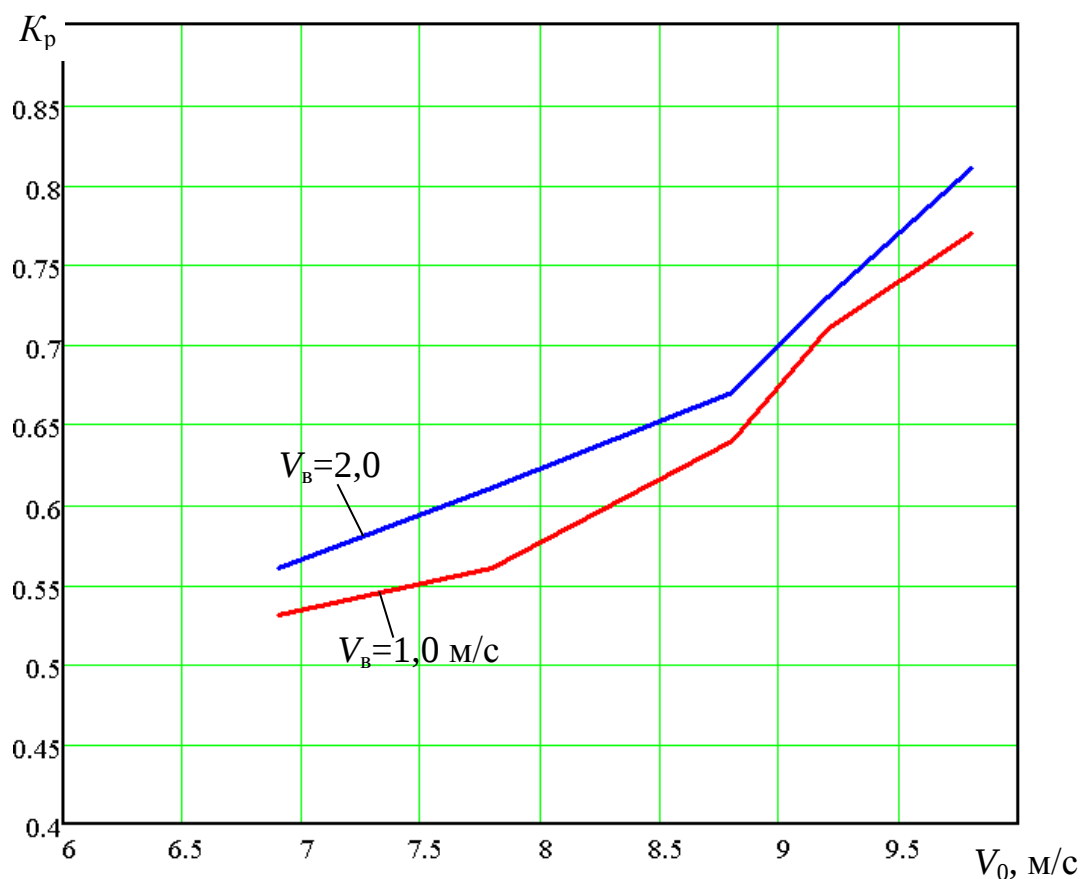


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента распределения воды K_p в штольне от начальной скорости капль V_0 , м/с, и скорости вентиляционного потока V_B , м/с, при одновременной работе 5 распылителей

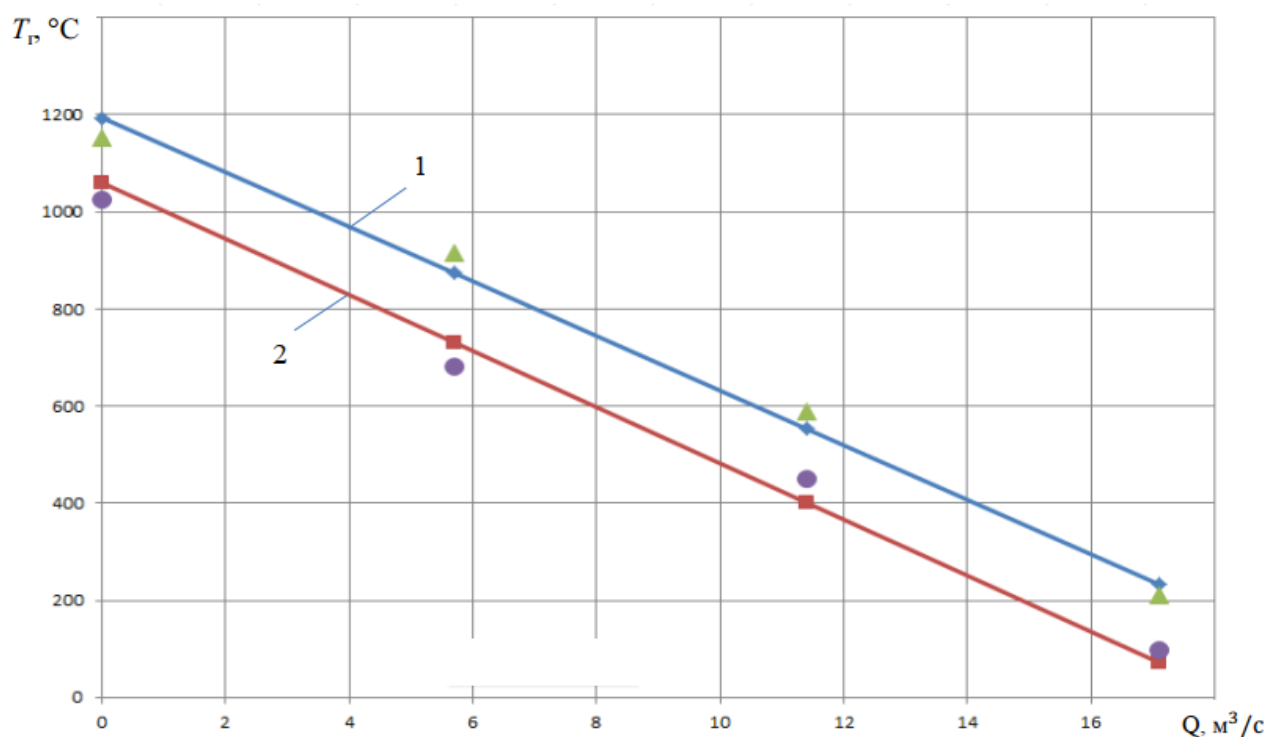
3.4 Исследование процесса охлаждения пожарных газов мелкораспыленной водой

Данные огневых экспериментов по охлаждению пожарных газов представлены в таблице 3.6 и на рисунках 3.11 -3.12.

Таблица 3.6 – Результаты огневых экспериментов

Эксперимент (пожарная нагрузка в соответствии с табл.3.2)	Скорость вентиляци онного потока, $V_{в}$, м/с	Температура пожарных газов до завесы, °С					Температура пожарных газов после завесы, °С										Примечание
		расчет ная $T_{ГК}^*$	измеряемая				Количество распылителей, n_p										
			$T_{ГК1}$	$T_{ГК2}$	$T_{ГК3}$	$\bar{T}_{ГК}$	1		2		3		4		5		
							рассчитанная, $T_{Г}^*$	средняя измеряемая, $\bar{T}_{Г}$	рассчитанная, $T_{Г}^*$	средняя измеряемая, $\bar{T}_{Г}$	рассчитанная, $T_{Г}^*$	средняя измеряемая, $\bar{T}_{Г}$	рассчитанная, $T_{Г}^*$	средняя измеряемая, $\bar{T}_{Г}$	рассчитанная, $T_{Г}^*$	средняя измеряемая, $\bar{T}_{Г}$	
I	1,0	1194	1230	1150	938	1151	874	-	553	-	233	210	-	-	-	-	л
	2,0	1194	1880	1795	1755	1138	933	-	672	-	411	-	150	117	-	-	л
II	1,0	1060	1085	982	933	1024	731	-	401	-	72	97	-	-	-	-	л
	2,0	1060	1120	1066	1014	1018	791	-	523	-	255	199	-	-	-	-	л

Примечание: л – пожар локализован



- 1 – расчетные данные при максимальной нагрузке
- 2 – расчетные данные при минимальной нагрузке
- ▲ – экспериментальные данные при максимальной нагрузке
- – экспериментальные данные при минимальной нагрузке

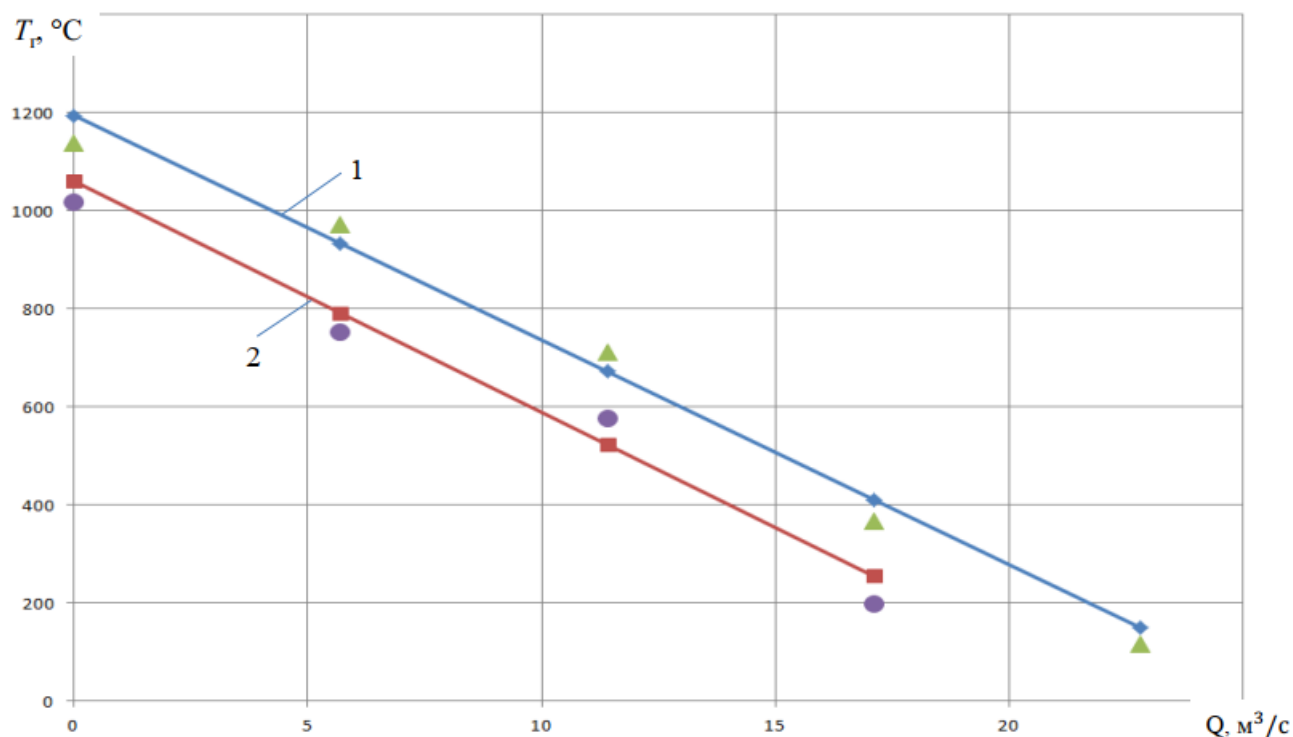
Рисунок 3.11 – Зависимость температуры охлаждения потока пожарных газов от расхода воды и пожарной нагрузки при скорости потока пожарных газов – 1 м/с (I, II эксперимент)

На рисунке 3.11 представлены результаты огневых экспериментов по охлаждению потока пожарных газов при максимальной (эксперимент I), значения показаны треугольниками, и минимальной (эксперимент II), значения показаны кругами, пожарных нагрузках и скорости потока пожарных газов – 1 м/с.

На этом же рисунке представлены результаты теоретических расчетов по формуле (2.33) для максимальной (эксперимент I), кривая 1, и минимальной (эксперимент II), кривая 2, пожарных нагрузках.

Расхождения между теоретическими расчетами температуры охлаждения и экспериментальными данными составили: для экспериментов с максимальной

нагрузкой (эксперимент I) 7,15%, а для экспериментов с минимальной нагрузкой (эксперимент II) – 14,6%.



- 1 – расчетные данные при максимальной нагрузке
- 2 – расчетные данные при минимальной нагрузке
- ▲ – экспериментальные данные при максимальной нагрузке
- – экспериментальные данные при минимальной нагрузке

Рисунок 3.12 – Зависимость температуры охлаждения потока пожарных газов от расхода воды и пожарной нагрузки, при скорости потока пожарных газов – 2 м/с (I, II эксперимент)

На рисунке 3.12 представлены аналогичные результаты экспериментов и теоретических расчетов, но при скорости потока пожарных газов – 2 м/с.

Расхождения составили: для экспериментов с максимальной нагрузкой (эксперимент I) 12,39%, а для экспериментов с минимальной нагрузкой (эксперимент II) – 14,16%.

Таким образом, данные огневых испытаний подтверждают результаты теоретических исследований по локализации подземных пожаров мелкораспыленной водой.

Очевидно, что увеличение скорости потока пожарных газов при прочих равных условиях приводит к увеличению требуемого для охлаждения пожарных газов до безопасной температуры количества распыленной воды.

Выводы к разделу 3

В результате проведения экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Подтверждена адекватность математической модели движения капель мелкораспыленной воды в пространстве, ограниченном поверхностью горной выработки, что позволило обосновать коэффициент распределения воды.

2. Коэффициент распределения воды зависит от вентиляционного режима, расстояния от распылителя до поверхности выработки, и от давления перед распылителем.

3. Распылители должны быть направлены в сторону движения потока пожарных газов. Такая ориентация увеличивает дальность полета капель воды и длину завесы.

РАЗДЕЛ 4

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

4.1. Методика расчета параметров противопожарной защиты подземных выработок водяными завесами

Установки локализации пожаров должны быть, по нашему мнению, установлены:

- в выработках, оборудованных ленточными конвейерами;
- в выработках, закрепленных деревянной или комбинированной крепью, с исходящей вентиляционной струей;
- в выработках, примыкающих к складам взрывчатых материалов;
- на сопряжениях лав с откаточными и вентиляционными штреками;
- в забоях длинных тупиковых выработок.

Кроме того, при борьбе с возникшим пожаром возникает необходимость его локализации, например, путем оперативной установки водяных завес в смежных выработках.

Согласно п. 10.2 [8] составной частью тушения пожара является его локализация, которую осуществляют:

- установкой охлаждающих водяных завес на пути распространения пожара;
- удалением горючего материала на пути распространения пожара (создание противопожарных разрывов или «голодных зон»);
- созданием препятствий на пути распространения пожара (закрытие противопожарных дверей, возведение перемычек);
- сокращением подачи свежего воздуха к очагу горения;
- подачей инертных газов;
- созданием условий для рециркуляции продуктов горения в замкнутом контуре;
- сочетанием приведенных выше способов.

В приложении 11 (таблица 7) [8] приводится методика определения параметров водяной завесы. В методике предусмотрено определение следующих параметров:

- количество распылителей в одном эшелоне, n_p , шт.;
- количество эшелонов в выработке, N , шт.;
- температура продуктов горения после прохождения водяной завесы, T_r , К.

Исходными данными являются:

- Q_c – расход воды в противопожарном трубопроводе в месте установки завесы, м³/ч (м³/с);
- d_p – диаметр проходного отверстия распылителя, мм;
- S_b – площадь поперечного сечения выработки в месте установки завесы, м²;
- V_b – скорость движения воздушного потока в месте установки водяной завесы.

Определение параметров завесы осуществляется в соответствии с таблицей, при разработке которой были приняты следующие допущения:

- температура продуктов горения на входе в завесу – 1000 °С;
- давление воды в противопожарном трубопроводе – 0,6 МПа;
- диаметр проходного отверстия распылителя (для водоразбрызгивателя ВВР-1, УЛПП-2 – $d_p=16$ мм).

Таким образом, данная методика не учитывает параметров пожара, гидравлических параметров противопожарного трубопровода, распылителей, дисперсности завесы, что зачастую приводит к тому, что эффективность завес невелика, пожар не удается локализовать, и он получает развитие.

Разработанная «Методика расчета параметров тушения и локализации подземных пожаров» [116] лишена указанных недостатков. Она вошла в качестве Приложения в «Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Донецкой Народной Республики».

Методика состоит из двух частей:

– методика расчета параметров локализации подземных пожаров водяными завесами;

– методика расчета параметров локализации и тушения пожаров на приводных станциях ленточных конвейеров.

4.1.1. Методика расчета параметров локализации подземных пожаров водяными завесами

Алгоритм расчета водяной завесы представлен блок-схемой на рисунке 4.1.

Расчет необходимо начинать с оценки пожароопасности аварийной горной выработки, то есть с определения вида и количества пожарной нагрузки в ней. Затем необходимо оценить параметры возможного очага пожара. Такими параметрами являются скорость распространения пожара по выработке и температура газового потока на выходе из зоны горения.

Скорость перемещения пожара вдоль выработки V_{Π} , м/с, определяется по формуле [10]

$$V_{\Pi} = \frac{V_B S_B}{q_0}, \quad (4.1)$$

где q_0 – объем воздуха, расходуемого на сгорание пожарной нагрузки на 1 м выработки, м³/м,

$$q_0 = \sum_{i=1}^n B_i q'_i, \quad (4.2)$$

где B_i – удельная горючая нагрузка для материала i -го вида, кг/м;

q'_i – удельный расход воздуха на сгорание 1 кг горючего материала i -го вида, м³/кг;

n – количество видов горючих материалов в аварийной выработке (лента, кабель, уголь, древесина).

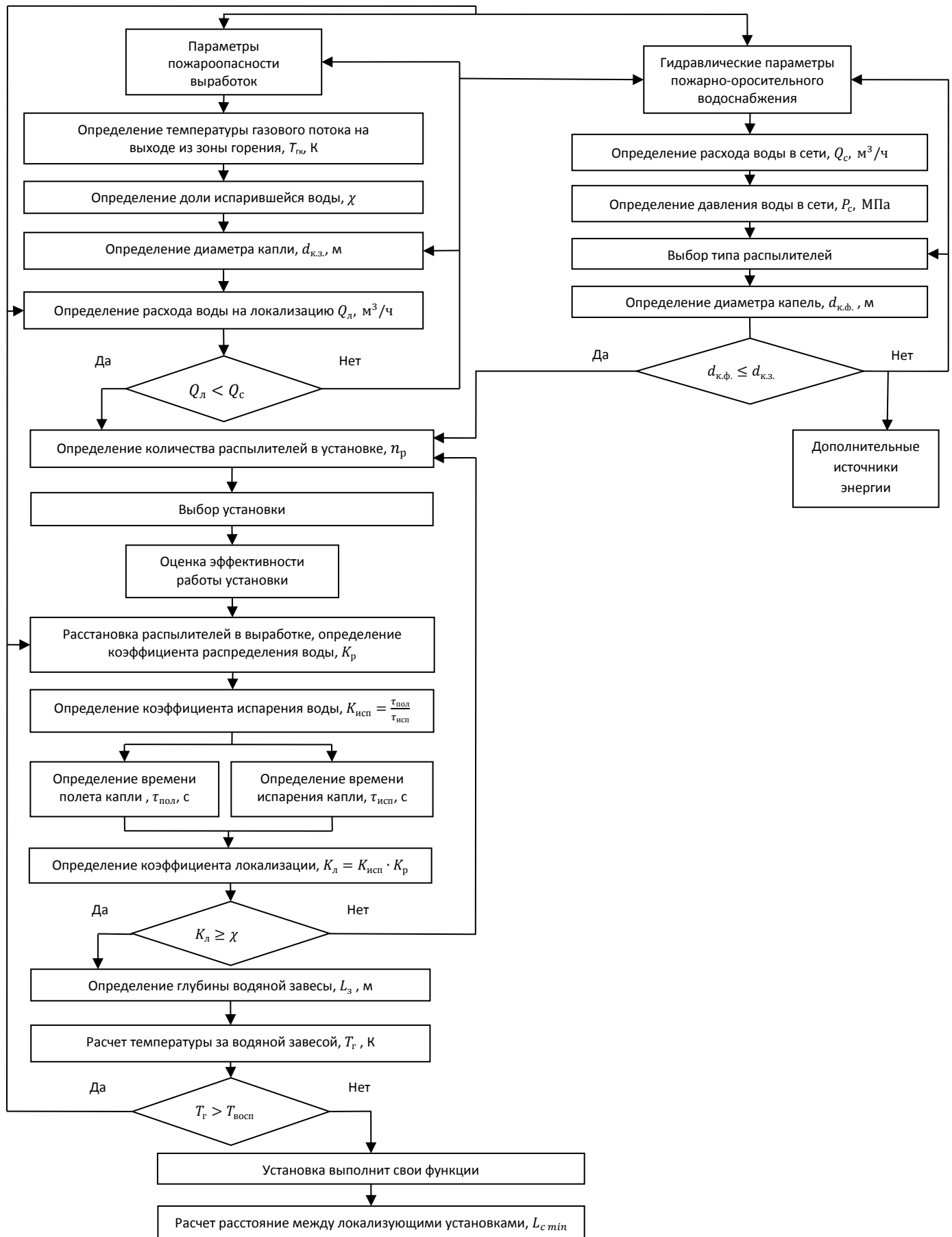


Рисунок 4.1 – Блок-схема расчета параметров водяной завесы для локализации подземных пожаров

Температура пожарных газов на выходе из зоны горения $T_{\text{ГК}}$, К, определяется по формуле [10]

$$T_{\text{ГК}} = \frac{V_{\text{п}} \sum_i^n B_i (0.8 Q_{\text{Hi}} - 586) + 26 G_{\text{Г}} + (0.1 + 0.08 V_{\text{В}}) F_{\text{СТ}}}{k_{\tau} F_{\text{СТ}} + 1.31 G_{\text{Г}}}, \quad (4.3)$$

где $V_{\text{п}}$ – скорость распространения пожара, м/с;

Q_{Hi} – низшая теплота сгорания i -го горючего материала, Дж/кг;

k_{τ} – коэффициент теплообмена между стенками выработки и газовым потоком, Дж/(м² · с · К), который определяется по формуле [109]

$$k_{\tau} = 4.12 \cdot 10^{-3} (1.249 + V_{\text{В}}), \quad (4.4)$$

$F_{\text{СТ}}$ – общая площадь поверхности выработки в зоне горения, участвующая в отборе теплоты, м²,

$$F_{\text{СТ}} = P_{\text{В}} V_{\text{п}} \tau_{\text{В}}, \quad (4.5)$$

$P_{\text{В}}$ – периметр поперечного сечения выработки, м;

$\tau_{\text{В}}$ – время выгорания пожарной нагрузки i -го вида в сечении выработки, с,

$$\tau_{\text{В}} = \frac{B_i}{V_{\text{mi}}}, \quad (4.6)$$

V_{mi} – массовая скорость выгорания i -го вида пожарной нагрузки, кг/(с · м²);

$G_{\text{Г}}$ – объемный расход газового потока, м³/с.

Удельный массовый расход воды на водяную завесу определяется по формуле [10]

$$Z = \frac{4.66(T_{\text{ГК}} - T_{\text{ВОСП}})}{253 + 2513\chi}, \quad (4.7)$$

где z – удельный массовый расход воды, необходимый для охлаждения 1 кг/с расхода газового потока в аварийной выработке, кг/с,

$$\chi = \exp\left(-\frac{ad_k^2}{T_{гк}}\right). \quad (4.8)$$

Значения величины χ в зависимости от заданного диаметра каплей d_k и температуры $T_{гк}$ потока пожарных газов перед водяной завесой приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Значение доли испарившейся воды χ в завесе

Температура, $T_{гк}, ^\circ\text{C}$	Средний диаметр каплей d_k в водяной завесе, которые формируются установками локализации, мм					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	Значение величины, χ					
400	0,823	0,463	0,177	0,046	0,082	0,001
600	0,880	0,600	0,315	0,128	0,041	0,010
800	0,908	0,680	0,420	0,215	0,090	0,031
1000	0,923	0,735	0,500	0,292	0,146	0,063
1200	0,938	0,744	0,562	0,358	0,201	0,099

Фактический диаметр каплей воды (дисперсность завесы) определяется технической характеристикой распылителя.

Расход воды на охлаждение пожарных газов водяной завесой определяется по формуле

$$Q_{л} = zS_{в}V_{в}. \quad (4.9)$$

Расход воды из противопожарного трубопровода в точке подключения установки локализации Q_c , м³/с, определяется по формуле [10]

$$Q_c = \sqrt{\frac{H_{\text{общ}}}{S_n}}, \quad (4.10)$$

где $H_{\text{общ}}$ – давление в противопожарном трубопроводе в точке подключения завесы, м;

S_n – сопротивление сети противопожарного трубопровода, $\text{с}^2/\text{м}^5$.

При условии $Q_{\text{л}} > Q_c$ необходимо изменение гидравлических параметров противопожарного трубопровода в аварийной выработке или увеличение дисперсности завесы.

При условии $Q_{\text{л}} < Q_c$ определяем необходимое количество распылителей n_p , шт, исходя из площади сечения выработки, необходимого расхода воды и параметров факела воды образуемого в распылителе. При большем числе распылителей увеличивается расход воды на орошение поверхности выработки и снижается коэффициент использования воды. Число распылителей

$$n_{\text{ор}} = \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{ф}}}, \quad (4.11)$$

где $S_{\text{ф}}$ – площадь факела, образуемого одним распылителем, м^2 ,

$$S_{\text{ф}} = \pi L_{\text{ф}}^2 \cos^2 \beta, \quad (4.12)$$

где $L_{\text{ф}}$ – длина факела, образуемого одним распылителем, м.

Общий расход воды, поданной на локализацию пожара в выработке, делится на расход воды, находящейся во взвешенном состоянии и движущейся в свободном пространстве выработки, и воды, осевшей, не успев испариться, на стенках и почве выработки. Соотношение этих расходов определяет коэффициент распределения воды в горной выработке K_p в зависимости от типа распылителя, его месторасположения и угла вылета капель β , град.

Значения коэффициента распределения воды K_p в зависимости от давления перед распылителями и скорости вентиляционного потока приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значение коэффициента распределения воды K_p , при угле раскрытия факела $\beta = 45$ град

Давление воды перед распылителем, МПа	Коэффициент распределения воды, K_p
Скорость вентиляционного потока, $V_B=1,0$ м/с	
0,4	0,53
0,5	0,56
0,6	0,64
0,7	0,71
0,8	0,77
Скорость вентиляционного потока, $V_B=2,0$ м/с	
0,4	0,56
0,5	0,61
0,6	0,67
0,7	0,73
0,8	0,81

Рассчитывается коэффициент испарения капель

$$K_{\text{исп}} = \frac{\tau_{\text{пол}}}{\tau_{\text{исп}}}. \quad (4.13)$$

Среднее время полета капель $\tau_{\text{пол}}$ в зависимости от их диаметра определяется по таблице 4.3

Таблица 4.3 – Среднее время полета капель воды $\tau_{\text{пол}}$ вылетающих из распылителя

Начальный диаметр капли воды d_0 , м	0,1	0,2	0,3
Среднее время полета капель воды $\tau_{\text{пол}}$, с	0,9	0,41	0,35

Время испарения капли воды определяется по формуле (2.29)

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{5,89 \cdot 10^6 d_0^2}{\ln(1 + 0,00037 T_{\text{гк}})}, \quad (4.14)$$

где d_0 – начальный диаметр капли, мм.

Произведение коэффициента испарения воды $K_{\text{исп}}$ на коэффициент распределения воды K_p называется коэффициентом локализации K_l , который определяет долю воды от общего ее количества превращающуюся в пар, снижая температуру газового потока

$$K_l = K_{\text{исп}} K_p. \quad (4.15)$$

Необходимым условием эффективности работы завесы будет соотношение

$$K_l \geq \chi. \quad (4.16)$$

Глубина водяной завесы L_z , м, определяется по формулам

$$L_z = \begin{cases} V_B \tau_{\text{исп}}, & \text{если } \tau_{\text{исп}} < \tau_{\text{пол}}; \\ \tau_{\text{пол}} (V_0 \cos \beta + V_B), & \text{если } \tau_{\text{исп}} > \tau_{\text{пол}}. \end{cases} \quad (4.17)$$

$$V_0 = \sqrt{120 P_p}, \quad (4.18)$$

где P_p – давление перед распылителем, МПа.

В случае выполнения условия (4.16) производится расчет температуры газового потока за водяной завесой.

Температура газового потока T_r , К, при выходе его из зоны орошения определяется по формуле

$$T_{\Gamma} = T_{\Gamma K} - \frac{3q_p n_{op} \tau_{исп} K_L \rho_B r}{S_B L_3 \rho_{\Gamma} c_{\Gamma}}. \quad (4.19)$$

Рассматривается условие

$$T_{\Gamma} \leq T_{восп}. \quad (4.20)$$

При выполнении данного условия завеса выполнит свои функции.

При невыполнении условия (4.20) необходимо повторно рассчитать количество распылителей и их расстановку по сечению выработки.

Минимальное расстояние между локализирующими установками определяют по формуле

$$L_{c \min} = \frac{73.16 G_B}{(1.25 + \frac{G_B}{S_B}) \sqrt{S_B}} \ln \left[\frac{T_{\Gamma} - T_0}{T_{\text{тпс}} - T_0} \right], \quad (4.21)$$

где G_B – расход воздуха в выработке, м³/с;

T_0 – температура окружающей газовой среды при нормальном режиме работы, К;

$T_{\text{тпс}}$ – температура срабатывания пожарного извещателя, К;

$L_{c \min}$ – расстояние между установками локализации, при котором в зоне размещения следующей установки локализации по ходу вентиляционной струи температура газовой среды не будет превышать температуру срабатывания пожарного извещателя $T_{\text{тпс}}$ установки, то есть будет выполняться условие

$$T_{\text{тпс}} > T_{\Gamma}. \quad (4.22)$$

Количество установок в пределах выработки

$$N_{yc} = \left(\frac{L_B}{L_{c \min}} \right) - 1, \quad (4.23)$$

где N_{yc} – количество установок в пределах длины выработки;

L_B – длина выработки, м.

4.1.2. Методика расчета параметров локализации и тушения пожаров на приводных станциях ленточных конвейеров

Установка локализации пожара должна защищать наиболее пожароопасные объекты в выработках, оборудованных ленточными конвейерами – приводные станции [10].

При пробуксовке приводного барабана конвейера происходит быстрое нарастание температуры ленты:

- если барабан футерован резиной – на (373 – 573) К в мин;
- если барабан не футерован – на (303 – 308) К в мин.

Расчет параметров развития и тушения пожара на приводной станции ленточного конвейера с помощью установки локализации производится в следующем порядке.

Расход газозвдушного потока по выработке с учетом газообразных продуктов горения G_r , м³/с, определяется по формуле

$$G_r = G_B + \frac{2L_{op}q_{пл}\beta_1}{\tau_{в.л.}\rho_{п.г}}, \quad (4.24)$$

где $q_{пл}$ – масса горючего материала, содержащаяся в одном погонном метре ленты, кг/м;

L_{op} – длина зоны орошения, м;

β_1 – степень выгорания материалов конвейерных лент в шахтных условиях;

$\tau_{в.л.}$ – время выгорания горючей массы из конвейерной ленты, с.

Максимальная температура $T_{ГК}$, К, газозвдушного потока в аварийной выработке при пожаре в пределах приводной станции ленточного конвейера зависит от максимальной длины зоны горения, равной длине зоны орошения, создаваемой установкой локализации пожара, и вычисляется по формуле

$$T_{ГК} = \left[\frac{2L_{ор}q_{пл}\beta_1}{\tau_{в.л.}} Q_p^H + c_{рв}c_{ТВ}\rho_v t_0 - \frac{c_{рм}V_{пл}q_{пл}}{30} (T_{восп} - T_{л.0}) - \frac{2L_{ор}q_{пл}c_{рм}}{\tau_{в.л.}} (T_{восп} - T_0) \right] \frac{1}{c_{рг}c_{г}\rho_{г}}, \quad (4.25)$$

где Q_p^H – низшая теплота сгорания резино-технических материалов, из которых выполнена конвейерная лента, Дж/кг;

$c_{рв}$ – удельная массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

$c_{рм}$ – удельная массовая теплоемкость материала ленты Дж/(кг·К);

$V_{пл}$ – скорость движения пожара по ленте в начальной стадии развития, м/мин;

$T_{л.0}$ – температура ленты в выработке при нормальном режиме работы, К.

При локализации пожара в пределах приводной секции ленточного конвейера время установления теплового баланса $\tau_{ТБ}$, с, между очагом пожара и водяной завесой при условии, что фронт пламени вошел в контакт с границей зоны орошения, определяется по формуле

$$\tau_{ТБ} = \frac{c_{рм}q_{пл}(T_{восп} - T_{л.0})}{q_{ор.л} \beta_1 \rho_v [c_{рв}(T_{исп} - T_{в.0}) + \chi R]}, \quad (4.26)$$

где $c_{рв}$ – удельная массовая теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

$T_{в.0}$ – температура воды в противопожарном трубопроводе, К;

$T_{исп}$ – температура воды при испарении, К;

$q_{ор.л}$ – удельный расход воды на 1 м² поверхности приводной секции конвейера, $\frac{м^3}{м^2 \cdot с}$, определяемый по формуле

$$q_{ор.л} = \frac{Q_{в.у}}{D_{ф}L_{эф}}, \quad (4.27)$$

где $Q_{в.у}$ – расход воды через установку локализации пожара, м³/с, определяемый по формуле

$$Q_{в.у} = n_{ор} \mu \omega \sqrt{200 g P_{ор}}. \quad (4.28)$$

Для того, чтобы обеспечить расход $Q_{в.у}$, м³/с, через установку локализации пожара, позволяющий надежно и эффективно локализовать пожар на приводной станции конвейера, давление воды на входе в систему P_y , Па, должно быть не менее величины, определяемой по формуле

$$P_y = P_{ор} + \alpha_{фк} Q_{в.у}^2, \quad (4.29)$$

где $\alpha_{фк}$ – коэффициент гидравлического сопротивления узла (фильтр + автоматический клапан) установки локализации пожара, Па·с²/м⁶.

Для того, чтобы пожар не смог пройти по ленте в выработке, необходимо, чтобы соблюдалось следующее условие

$$\tau_{ТБ} < \tau_{доп}, \quad (4.30)$$

где $\tau_{доп}$ – допустимое время локализации пожара на приводной станции ленточного конвейера, с. Определяется по формуле

$$\tau_{доп} = \frac{60 L_{ор}}{V_{п}}. \quad (4.31)$$

Установки локализации пожара могут быть установлены и в других пожароопасных выработках.

Кроме того, предусматривается оперативная установка завес при активном тушении пожаров для предотвращения их проникновения в смежные выработки.

Методика дает возможность оценить эффективность применяемого противопожарного оборудования для локализации пожаров диспергированной водой в зависимости от степени пожароопасности защищаемого объекта и возможностей противопожарного трубопровода или же разработать новые высокоэффективные средства.

4.2 Тактико-технические приемы локализации пожара на подземных объектах шахты

Установки локализации подземных пожаров с использованием мелкораспыленной воды могут быть стационарными, размещенными на отдельных объектах шахты, и временными, оперативно устанавливаемые при необходимости в аварийной выработке.

По нашему мнению установки для создания водяных завес должны быть размещены:

- в выработках, оборудованных ленточными конвейерами;
- в устье воздухоподающих стволов;
- в отдельных околоствольных выработках;
- на выемочных участках на сопряжении лавы с вентиляционным и откаточным штреками;
- в призабойном пространстве длинных тупиковых выработок газовых шахт.

Необходима привязка условий локализации к особенностям защищаемого объекта.

Рассмотрим тактико-технические приемы постановки водяных завес для локализации пожаров на отдельных подземных объектах угольной шахты.

При этом будем учитывать особенности пожаров на конкретном объекте.

Вертикальные стволы

Пожары, возникающие в вертикальных воздухоподающих стволах, характеризуются следующими особенностями:

- при нисходящем потоке воздуха в стволе создается опасность быстрого распространения пожара по выработкам шахты;
- наличие деревянных проводников и расстрелов в стволе, отложение смазочных материалов на его стенках и конструкциях, а также интенсивный вентиляционный поток воздуха способствуют быстрому развитию пожара;
- высокая температура и задымленность в стволе выше очага пожара и угроза обрушения горящих материалов, исключают возможность подхода к очагу пожара снизу для активного воздействия на него огнетушащими средствами;
- в случае резкого нарастания температуры в стволе возникает опасность самопроизвольного опрокидывания вентиляционной струи.

В начальный период возникновения пожара включаются устройства для создания водяных завес, установленных в устье ствола. Необходимый общий расход воды, которую подают через эти устройства, определяется по формуле

$$Q = q_{\text{ств.}} S_{\text{ств.}} = (4 \dots 5) S_{\text{ств.}}, \quad (4.32)$$

где Q – общий расход воды, подаваемой в устройства для создания завес, $\text{м}^3/\text{с}$;

$q_{\text{ств.}}$ – удельный расход воды в завесе, $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$;

$S_{\text{ств.}}$ – площадь сечения ствола, м^2 .

Необходимое количество установок локализации определяется по формуле

$$N = \frac{Q}{Q_{\text{уст}}}, \quad (4.33)$$

где $Q_{\text{уст}}$ – расход воды, используемый для создания завесы в установке.

Установки размещаются в устье воздухоподающего ствола по его периметру.

Околоствольные выработки

Пожары в околоствольных выработках отличаются быстрым развитием, в результате чего возникает угроза распространения горения к стволу, складу взрывчатых материалов, электроподстанциям, насосным и другим машинным камерам, выход из строя которых грозит нарушением нормальной работы всей шахты.

Тушат пожары в околоствольных выработках активным способом, охлаждая очаги водой или пеной со стороны поступающей струи воздуха с одновременной установкой водяных завес на всех путях возможного распространения огня.

Одним из самых опасных объектов при пожаре становится склад взрывчатых материалов (далее – склад ВМ), применяемых в шахтах при буровзрывных работах.

В начале подводящих к складу ВМ ходков (со стороны входа и выхода) должны быть установлены противопожарные двери и установки для создания водяных завес.

Установки для создания водяных завес на складах ВМ в настоящее время отсутствуют. При пожаре вблизи склада ВМ, при возможности, в первую очередь необходимо вынести ящики со взрывчатыми веществами и коробки с детонаторами и удалить их на безопасное расстояние. Общее время эвакуации склада, мин

$$\tau_{эв} = \max \left(\frac{3G_{ВВ}}{n_В m_В}, \frac{10G_Д}{n_Д m_Д} \right), \quad (4.34)$$

где $G_{ВВ}$ – суточный расход взрывчатого вещества (далее – ВВ) по шахте, кг;

$m_В$ – масса ящика с ВВ, переносимого одним горнорабочим, кг;

$n_В$ – количество горноспасателей (членов ВГК, ШГС), занятых выносом ВВ;

τ_1, τ_2 – время движения горнорабочего с грузом ВВ или детонаторов от склада на безопасное расстояние и обратно соответственно, мин;

$G_Д$ – количество детонаторов, расходуемых на шахте в сутки;

$m_Д$ – количество детонаторов, переносимых одним горнорабочим;

n_d – количество горнорабочих (горноспасателей), занятых выносом со склада детонаторов.

Тогда необходимая огнестойкость $\tau_{огн.}$, мин, противопожарного комплекса (противопожарные двери и водяные завесы) должна отвечать условиям

$$\tau_{огн.} \geq \tau_{эв.} \quad (4.35)$$

Высокая теплопроводность металлической противопожарной двери обуславливает низкий предел огнестойкости. Так, дверь из листовой стали толщиной 6,5 мм при нагревании уже к 30-й минуте деформируется настолько, что отходит от рамы на 10...12 см. Достаточный предел огнестойкости имеют стальные двери, покрытые теплоизолирующими материалами. Так, двери с металлическим каркасом с теплоизолирующим покрытием из асбестокартон или совелитовых плит имеют высокий предел огнестойкости ($\tau_{огн.} \geq \tau_{эв.}$). С использованием противопожарного комплекса, включающего водяную завесу, предел огнестойкости возрастает. Однако методика расчета параметров создаваемой завесы, обеспечивающей выполнение условия (4.35), отсутствует. Если выполнить эвакуацию склада невозможно из-за высокой температуры или по другим причинам, то необходимо закрыть и уплотнить противопожарные двери со стороны подводящих выработок, установить перед ними водяные завесы, создаваемые установками тушения и локализации пожаров распыленной водой, и вывести людей из всех прилегающих к складу выработок, в том числе выработок околоствольного двора.

Такие же установки должны быть размещены на входе в камеры центральных подстанций.

Наклонные и горизонтальные выработки

В наклонных и горизонтальных выработках наряду с активным тушением необходимо принять меры по локализации очага. Если из-за высокой температуры и сильной задымленности горноспасатели не могут непосредственно установить установку для локализации пожара в аварийной выработки на исходящей струе,

возможно применение местного реверсирования (при соблюдении всех необходимых условий).

Тупиковые выработки

Тушение пожаров в газообильных тупиковых выработках осложняется следующими факторами:

- опасность нарушения проветривания тупикового забоя и возможность накопления в связи с этим горючих газов до взрывоопасной концентрации;
- наличие взрывоопасных скоплений метана в пустотах за крепью выработки или его слоевых скоплений вблизи очага горения;
- ограничение или отсутствие подступов к очагу горения для непосредственного его тушения;
- возможность ведения работ по активному тушению пожара или его изоляции только со стороны исходящей струи, в зоне высокой температуры и сильной задымленности;
- ограниченная информация о месте возникновения пожара, газовом составе в зоне горения и о развитии пожара.

Поэтому зачастую горноспасатели вынуждены из-за опасности взрыва газовоздушной смеси покинуть тупиковую выработку.

Перед уходом они должны оставить открытым концевой кран на участковом пожарном трубопроводе и подсоединить к нему установку для локализации пожара.

Это требование (п. 59) имеется и в [8]. Однако расчет параметров этой завесы отсутствует.

Оценим необходимый расход воды для создания водяной завесы в тупиковой выработке. Из общего количества экзогенных пожаров, возникающих в тупиковых выработках, 65 % обусловлено первоначальным воспламенением метана (в суфляре или слоевом скоплении). В большинстве случаев возникновения пожаров в течении 3 – 4 часов не развиваются (до момента воспламенения элементов крепи и вентиляционного трубопровода).

Среднеобъемная температура в призабойном пространстве стабилизируется. Например, для тупиковой выработки с сечением 4...16 м² с метановыделением, не

превышающим $1 \text{ м}^3/\text{мин}$, среднеобъемная температура не превышает $100...120^\circ \text{С}$. Учитывая, что скорость проветривания тупиковых выработок составляет $0,2...1,0 \text{ м/с}$ расход воды для завесы должен составлять $Q_{\text{вод.}} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Учитывая отставание трубопровода от груди забоя выработки (8 м) определяем, что для локализации пожара необходима одна установка с расходом воды $5,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ и длиной завесы 10 метров.

Очистные выработки (лавы)

На выбор способов и средств активного тушения пожаров в очистных выработках влияют следующие факторы:

- в лавах на пластах с углом падения более 30° град, подход к очагу пожара снизу (со стороны свежей струи воздуха), как правило, невозможен из-за угрозы травмирования людей падающими горящими материалами и обрушивающейся породой;

- тушение пожаров в лавах на тонких пластах мощностью менее $0,6 \text{ м}$ непосредственным воздействием на очаг пожара трудно осуществимо, а зачастую вообще невозможно, ввиду отсутствия подхода к нему в респираторах;

- выгорание крепи в лаве приводит к обрушению пород кровли, вызывающему нарушение проветривания, что создает опасность вспышки и взрыва метановоздушной смеси и распространения пожара в выработанное пространство;

- распространение пожара из призабойного пространства в выработанное делает его активное тушение непосредственным воздействием на очаги горения практически невозможным, что вызывает необходимость временной изоляции аварийного участка перемычками.

При тушении пожаров в очистных забоях, прежде всего, необходимо предотвращать распространение огня в выработанное пространство и прилегающие выработки водяными завесами, установленными на расстоянии $5...15 \text{ м}$ от конца лавы.

Для безопасного прокладывания пожарных рукавов по вентиляционному штреку и установки водяной завесы производят местное или общешахтное реверсирование вентиляционной струи на аварийном участке (при отсутствии

угрозы скопления в районе очага пожара горючих газов взрывоопасной концентрации) с последующим ее закорачиванием через ближайшую выработку на общую исходящую струю крыла или шахты в целом. Если в выработках с исходящей из лавы вентиляционной струей высокая температура отсутствует, то прокладывание рукавов по вентиляционному штреку и установку завес производят при нормальном режиме проветривания, однако подачу воды и других средств пожаротушения на очаг в этот период прекращают во избежание парообразования и повышенной влажности по ходу движения пожарных газов.

Таким образом, для локализации пожаров в лавах необходимо устанавливать водяные завесы в оперативном режиме при возникновении пожаров.

На время установки водяных завес за очагом пожара для предотвращения его распространения в выработанное пространство или прилегающие выработки возможно временное, в пределах выемочного участка, местное реверсирование вентиляционной струи.

Реверсирование вентиляционной струи на пластах с углом падения более 30° не рекомендуется из-за опасности её опрокидывания под действием тепловой депрессии. Если очаг пожара находится в выработанном пространстве или другом труднодоступном месте, его локализацию следует осуществлять, нагнетая по скважинам, пробуренным с поверхности или ближайших вышележащих горизонтов, воду, пену, гипсовые, пеногипсовые и глинистые растворы.

4.3 Разработка установки локализации пожаров мелкораспыленной водой в горных выработках

Ранее обосновано, что водяные завесы являются одним из основных средств локализации подземных пожаров. Эффективность их действия зависит от расхода воды, ее дисперсности и времени контакта с продуктами горения, параметров завесы (глубины, угла раскрытия факела, полноты его заполнения каплями). При существующих и применяемых в настоящее время на шахтах средствах и способах локализации во многих случаях охлаждение газового потока явно недостаточно, а

увеличение подачи воды и ее дисперсности ограничены техническими возможностями противопожарного трубопровода и используемых установок локализации пожара.

К недостаткам эксплуатируемых в угольных шахтах установок локализации пожара (УВЗ, ВВР-1 и др.), как отмечено выше, относятся: несоответствие расходных характеристик распылителей требуемым по условиям пожара значениям, неэффективность создаваемых завес, малая дисперсность, неравномерность заполнения каплями факела, а, следовательно, и сечения подземной выработки и т.д. Поэтому возник вопрос о разработке эффективных установок локализации пожаров, которые могут находиться в стационарном положении в пожароопасных местах (на линейной части конвейеров, в выработках с исходящей струей, закрепленных деревянной или комбинированной крепью, на спряжениях лав со штреками), а также использоваться горноспасательными подразделениями для оперативной установки водяных завес на аварийном и смежных с ним участках. Была разработана установка локализации пожаров на базе установки УЛТВ.

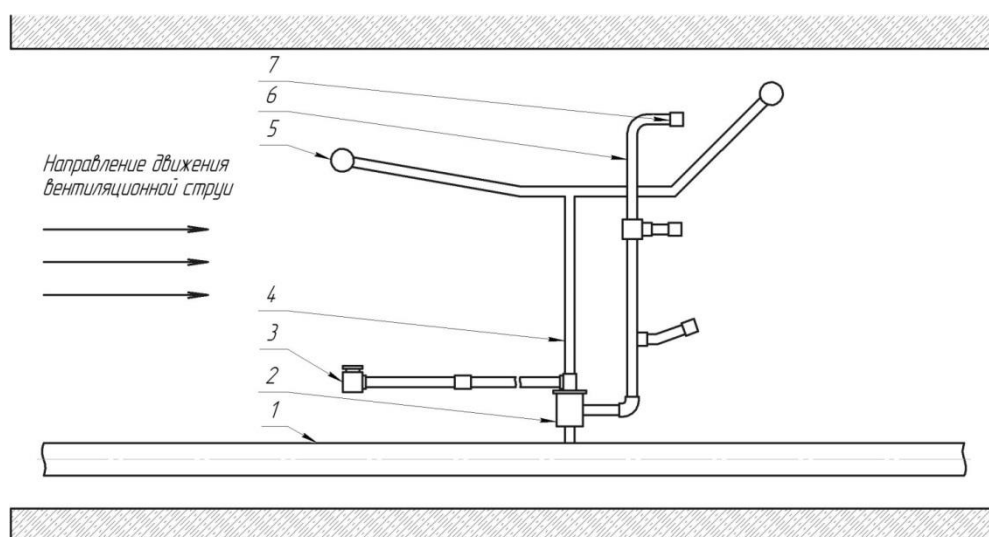
Установка локализации пожаров, схема которой представлена на рисунке 4.2, состоит из клапана автоматического 2, подсоединенного к противопожарному трубопроводу 1, крана ручного пуска 3, побудительного трубопровода 4 с тепловыми датчиками 5 распределительного трубопровода 6 с распылителями 7.

Клапан автоматический (рисунок 4.3) предназначен для автоматического или ручного пуска установки локализации пожаров и фильтрации поступающей воды. Клапан имеет напорную, побудительную и выходную полости, отделенные друг от друга эластичной мембраной.

Запуск установки локализации пожаров производится путем автоматического или ручного включения.

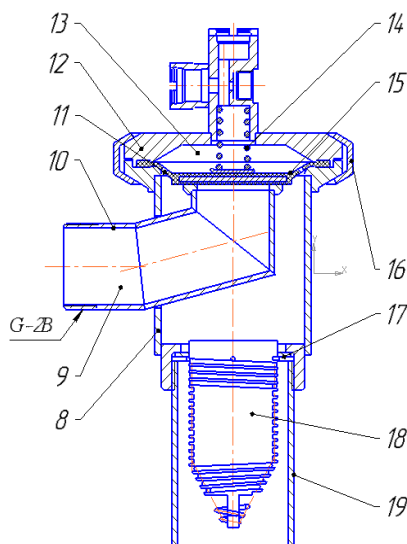
Побудительный трубопровод имеет два режима эксплуатации:

– состояние ожидания применения – когда пожар отсутствует, при этом часть установки заполнена водой под давлением, клапан закрыт, побудительный трубопровод так же заполнен водой под давлением;



- 1 – противопожарный трубопровод; 2 – клапан автоматический;
 3 – кран ручного пуска; 4 – побудительный трубопровод; 5 – тепловой датчик;
 6 – распределительный трубопровод; 7 – распылитель РВ-10

Рисунок 4.2 – Схема установки локализации пожаров



- 8 – полость напорная; 9 – полость выходная; 10 – корпус; 11 – отверстие перфорированное; 12 – крышка; 13 – полость побудительная; 14 – пружина;
 15 – мембрана; 16 – хомут; 17 – прокладка; 18 – фильтр; 19 – штуцер

Рисунок 4.3 – Клапан автоматический

– рабочее состояние – когда, вследствие аварийного повышения температуры установка автоматически или вручную включается в работу.

Технические данные установки локализации пожаров приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Технические данные установки

Показатель назначения	Норма
1. Минимальное рабочее давление, МПа, не менее	0,4
2. Максимальное рабочее давление, МПа, не более	1,5
3. Расход воды через установку (5 распылителей), м ³ /ч, не менее	28,5
4. Масса, кг, не более	40

Установка локализации пожаров работает следующим образом. В состоянии ожидания гидравлический побудительный трубопровод 4 герметичен.

Через перфорированные отверстия 11 в мембране 15 вода под давлением из напорной полости 8 заполняет побудительную полость 13 клапана, под действием разности усилий и пружины 14 мембрана 15 находится в седле клапана, перекрывая выходную полость 9.

При возникновении аварийной ситуации тепловой датчик 7 разрушается, таким образом происходит разгерметизация гидравлической побудительной линии 4 и сброс воды из побудительной полости 13. За счет усилия, действующего на мембрану 15 со стороны напорной полости 8, мембрана отходит от седла и открывается вход в выходную полость 9.

Вода под давлением проходит под мембраной, поступая в выходную полость и далее по распределительному трубопроводу 6 к распылителям 7, создавая водяные завесы для локализации пожара в горной выработке.

После локализации пожара восстанавливается герметичность побудительного трубопровода. За счет поступления воды под давлением через перфорированные отверстия 11 в мембране 15 восстанавливается давление в побудительной полости

клапана и под действием пружины 14 мембрана ложится на седло, перекрывая вход в выходную полость 9 клапана.

Анализ работы и технических характеристик выпускаемых установок локализации пожара свидетельствует об эффективности использования гидравлического запуска установки с помощью тепловых датчиков, устанавливаемых на побудительном трубопроводе.

Установка локализации пожаров с распылителями воды РВ-10 значительно превосходит такие установки как ЮРЭК [117] и т.д.

Преимущество установки локализации пожаров заключается не только в равномерном заполнении объема выработки мелкораспыленной водой, но и в обеспечении возможности блокировки работы ленточного конвейера и, соответственно, передачи сигнала на пульт диспетчера.

4.4 Оценка экономического эффекта от внедрения результатов работы

Экономический эффект от внедрения разработанной установки для локализации пожара мелкораспыленной водой, а также рекомендаций по ее расстановке в горных выработках угольных шахт определяется тем, что она повышает эффективность локализации пожара.

Фактором экономической эффективности является сокращение пожаров III-IV категории за счет их эффективной локализации и активного тушения.

Например, пожар, возникший 30.03.2012 г. в тупике погашения 120 конвейерного штрека на сопряжении с лавой №119 шахты «Степная» ГП «Львовуголь», не удалось локализовать водяной завесой ВВР-1, установленной у ПК-16. Пожар прорвался в выработанное пространство лавы №119 и аварийный участок пришлось изолировать и затопить. Ущерб составил 17334 тыс. рос. руб. При наличии установки локализации и тушения пожара возле привода конвейера СП-264, на котором произошло возгорание штыба и смазочных материалов, пожар был бы ликвидирован на начальной стадии.

Аналогичная ситуация сложилась при пожаре 14.04.2013 г. на шахте «Комсомолец Донбасса» ПАО ДТЭК, когда в результате нарушения паспорта буровзрывных работ в 12 западном вентиляционном штреке пл.к₅ 1-й западной лавы пл. I₄ блока 5 произошло возгорание метановоздушной смеси. Из-за отсутствия автоматической завесы на сопряжении пожар не удалось локализовать. Аварийный участок был изолирован и затоплен. Ущерб превысил 4 млн. рос. руб.

23.02.2014 г. на шахте «Бутовская» Макеевуголь на сопряжении восточного людского ходка с 4 западной разгрузочной лавой пласта П1 в следствие возгорания метана в зоне фрикционного искрения от трения зубцов комбайна и пород кровли возник пожар. Из-за отсутствия автоматической водяной завесы на сопряжении огонь проник в лаву и примыкающий выработки. Установка горноспасателями водяной завесы на исходящей струе с использованием ВВР-1 было запоздалым решением. Пожар получил сложный характер. Ущерб составил более 360 тыс. рос. руб.

17.06.2014 г. на шахте «Южнодонбасская №3» в конвейерной выработке 13 восточной лавы пласта С₁₁ вследствие возгорания метана, скопившегося на почве выработки, и отсутствия каких-либо систем защиты на протяжении всей выработки, возник пожар, получивший сложный характер, ущерб от которого составил 205 тыс. рос. руб.

Отсутствие установки локализации пожара, недостаток воды в противопожарном трубопроводе или несоответствие параметров завесы (создаваемой с помощью морально устаревшей ВВР-1) возникли и усложнили пожары на шахтах:

ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» шахта им. Героев Космоса» 07.02.2011 г. (сопряжение наклонного квершлага со сбойкой на скиповый ствол гор. 470 м). Ущерб составил 2550 тыс. рос. руб.;

ПАО «ДТЭК» шахта Комсомолец Донбасса» 29.06.2011 г. (сопряжение конвейерного штрека с 3-й восточной лавой пл. L₆ бл. 2). Ущерб – 4144 тыс. рос. руб.;

ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» шахта Степная» 23.07.2011 г. (сопряжение 158 лавы со 160 сб. штреком гор 490 м). Ущерб – 6362 тыс. рос. руб.;

ГП «Красноармейскуголь» шахта им А.Г. Стаханова» 11.07.2009 г. (сопряжение 1-й северной лавы с вентиляционным штреком группового уклона пл. 1₁–1₃). Ущерб – 6280 тыс. рос. руб.;

ГП «Львовуголь» шахта Степная» 02.04.2008 г. (тупик погашения 115 конвейерного штрека пл. L₇ «Сокальский»). Ущерб – 16690 тыс. рос. руб.

В 2020 году произошло 4 экзогенных пожара суммарным ущербом 19 млн рос. руб.: на ОП «Шахта им. М.И. Калинина», ОП «Шахта «Калиновская-Восточная» ГП «Макеевуголь», шахта им. А.А. Скачинского ГП «ДУЭК».

К пожарам IV категории относится пожар, произошедший 17.11.2020 г. на шахте им. А.А. Скачинского ГП «ДУЭК» в первом вентиляционном ходке 5 западной лавы. Вследствие неэффективности поставленных водяных завес пожар прорвался из ходка в лаву и другие сопряженные выработки. Аварийный участок был изолирован и затоплен.

Согласно [118] к I категории отнесены пожары, ликвидированные членами ВГК с использованием первичных средств пожаротушения, без вызова подразделений ГВГСС, а ко II-IV категориям – пожары, ликвидированные и потушенные работниками ГВГСС (с привлечением ВГК). При этом ко II категории отнесены пожары, ликвидированные активным способом или, автоматическими установками локализации, размещенными на данном объекте, а к III-IV – с использованием изоляции пожаров в зависимости от величины материального ущерба (IV категория – пожары с ущербом свыше 2 млн рос. руб.).

В этом случае воспользуемся «Методическими указаниями» [118]. Расчет выполняли по формуле:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & \left\{ \sum_{i=1}^n (C_{i1} + E_H K_{i1}) A_{i1\text{нас}} \frac{\bar{P}_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(\sum_{i=1}^n I'_{i1} - I'_2) - E_H (K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_H} + \right. \\ & \left. + \frac{\mathcal{E}_{\text{нас}}^{\text{ав}} N_{\text{пож}}}{(P_2 + E_H) S_{\text{об}}} - (C_2 + E_H K_2) A_{2\text{нас}} \right\} A_2^1, \end{aligned} \quad (4.36)$$

где Ξ – годовой экономический эффект, рос. руб.;

C_{i1} – текущие затраты при базовом варианте, рос. руб.;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $E_n=0,15$;

K_{i1} – капитальные затраты при базовом варианте, рос. руб.;

$A_{i1нас}$ – необходимое по ППБ количество единиц i -го средства локализации пожара на данном объекте, ед.;

$\bar{P}_1$ – доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление;

P_2 – то же для новых средств локализации пожара;

$\sum_{i=1}^n I'_{i1}$ – годовые эксплуатационные издержки потребителя при использованиях им базовых средств локализации пожара в расчете на один защищаемый объект, рос. руб.;

I'_2 – то же для новых средств защиты, рос. руб.;

K_2^1, K_1^1 – сопутствующие капитальные вложения потребителя при использовании базовых и новых средств локализации пожара в расчете на один защищаемый объект, рос. руб.;

$\Xi_{нас}^{ав}$ – экономия текущих и капитальных затрат, связанных с аварийно-восстановительными работами, в расчете на одну аварию, рос. руб.,

$$\Xi_{нас}^{ав} = [M(U_1^T) + E_n M(U_1^K)] - [M(U_2^T) + E_n M(U_2^K)], \quad (4.37)$$

где $M(U_1^T), M(U_2^T)$ – математическое ожидание текущих затрат, связанных с аварийно-восстановительными работами, при использовании базовой и новой техники в расчете на один пожар, рос. руб.;

$M(U_1^K), M(U_2^K)$ – то же для капитальных затрат, рос. руб.;

$N_{пож}$ – среднегодовое число пожаров на защищаемых объектах, ед.;

$S_{об}$ – общее число объектов, подлежащих защите, ед.;

C_2 – текущие затраты при новом варианте, рос. руб.;

K_2 – капитальные затраты при новом варианте, рос. руб.;

$A_{2\text{нас}}$ – необходимое по ППБ количество единиц средств локализации пожара на данном объекте при новом варианте, ед.;

A_2^1 – число защищаемых объектов, ед.

Применительно к теме диссертации нет необходимости связывать расчет экономического эффекта с внедрением на защищаемом объекте нового вида средств локализации пожара, так как ранее эти объекты не были защищены средствами локализации пожара. Поэтому экономический эффект рассматриваем как снижение ущерба от возможных пожаров. Тогда (4.36) принимает вид:

$$\mathfrak{E}_\Gamma = \frac{\mathfrak{E}_{\text{нас}}^{\text{аб}} N_{\text{пож}} A_2^1}{(P_2 + E_n) S_{\text{об}}}. \quad (4.38)$$

Математическое ожидание ущерба от пожара определяли по формуле

$$M(U_j) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \bar{U}_{ij}, \quad (4.39)$$

где P_{ij} , $\bar{U}_{ij}$ – вероятность развития пожара до i -й категория ($i=1\dots 4$) при использовании j -го способа локализации ($j=1,2$ соответственно для традиционного способа и вновь разработанных средств локализации пожара) и средний ущерб от одного пожара i -й категория, руб., соответственно.

Для базового варианта математическое ожидание ущерба определяли по формуле (рассматриваем пожары II-IV категорий)

$$M(U_1) = P_{21} \bar{U}_{21} + P_{31} \bar{U}_{31} + P_{41} \bar{U}_{41}. \quad (4.40)$$

Математическое ожидание ущерба от пожара с учетом применения разработанного средства локализации пожара определяли по формуле

$$M(U_2) = P_{22} \bar{U}_{22} + P_{32} \bar{U}_{32} + P_{42} \bar{U}_{42}. \quad (4.41)$$

В связи с тем, что пожарная техника воздействует на уже возникший пожар, среднегодовое число пожаров и загораний по рассматриваемой группе объектов, как для традиционного, так и для нового способа остается неизменным и равным фактическим значениям.

Поэтому $\bar{U}_{i1} = \bar{U}_{i2}$ для $i = 2 \dots 4$.

Сокращение ущерба происходит за счет перераспределения вероятности локализации пожаров между II категорией и категориями осложнившегося пожара (III-IV).

Значение математического ожидания ущерба при использовании разработанных установок локализации определяли из выражения

$$\begin{aligned} M(U_2) = & (1 - \beta^{\text{II}}) P_{21} \bar{U}_{21} + \\ & + (1 - \beta^{\text{II}}) P_{31} \bar{U}_{31} + (1 - \beta^{\text{II}}) P_{41} \bar{U}_{41}, \end{aligned} \quad (4.42)$$

где β^{II} – вероятность события, состоящего в том, что пожар, относившийся к III-IV категориям, при использовании установок локализации ликвидируется на стадии активного тушения (II категория).

Значения P_{22} , P_{32} , P_{42} определяли с учетом того, что $\sum_{i=2}^n P_{i2} = 1$, а также сохранения пропорциональности числа пожаров II-IV категорий по формулам

$$\begin{aligned} P_{22} &= (1 - \beta^{\text{II}}) P_{21}; \\ P_{32} &= (1 - \beta^{\text{II}}) P_{31}; \\ P_{42} &= (1 - \beta^{\text{II}}) P_{41}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Вероятность того, что возникший пожар будет потушен активным способом (II категория) при использовании установок локализации рассчитывали по формуле

$$P_{22} = P_{вз}^{ун}, \quad (4.44)$$

где $P_{вз}^{ун}$ – вероятность выполнения задачи по активному тушению пожара при использовании установок локализации.

Вероятность $P_{вз}^{ун}$ рассчитывали по формуле

$$P_{вз}^{ун} = k_{г} P_{бр} P_{эт}^c k_{ш}, \quad (4.45)$$

где $k_{г}$ – коэффициент, характеризующий готовность установок локализации выполнить задачу по локализации пожара;

$P_{бр}$ – вероятность безотказной работы установок локализации после ее срабатывания;

$P_{эт}^c$ – вероятность успешной локализации пожара, связанная с готовностью установок локализации поддерживать заданные параметры локализации (напор и расход воды, размер капель и т.п.);

$k_{ш}$ – коэффициент, характеризующий условия эксплуатации установок локализации на защищаемом объекте.

Рассмотрим в качестве примера расчет годового экономического эффекта от разработки и внедрения в соответствии с рекомендациями [10] установки локализации пожара в конвейерных выработках, на сопряжении лав с вентиляционными штреками, длинных тупиковых выработках.

Расчет ожидаемых ущербов.

Распределение экзогенных пожаров, возникших на перечисленных выше объектах за период 2010-2020 гг., вероятности их возникновения и значения ущербов приведены в таблице 4.5 [1, 2, 3].

Таблица 4.5 – Экзогенные пожары в горных выработках за период с 2004 г. до 2020 г.

Показатель	Значения показателя			Итого
Категория тяжести	II	III	IV	-
Количество пожаров	32	24	24	80
Ущерб от пожаров, тыс. рос. руб.	1943,1	27121,6	456918,3	485983
Средние ущербы, тыс. рос. руб.	60,72	1130,06	19038,26	6074,78
Вероятность	0,40	0,30	0,310	1,0

Математическое ожидание ущерба от одного пожара при базовом варианте определяли по формуле (4.40)

$$M(U_1) = P_{21}\bar{U}_{21} + P_{31}\bar{U}_{31} + P_{41}\bar{U}_{41} = 0,4 \cdot 60,72 + 0,30 \cdot 1130,06 + 0,30 \cdot 19038,26 = 6074,76 \text{ тыс. рос. руб.}$$

Удельный вес текущих затрат в общей сумме затрат на аварийно-восстановительные работы в соответствии [118] $\gamma_m = 0,1$.

Тогда

$$M(U_1^T) = 0,1 \cdot 6074,76 = 607,47 \text{ тыс. рос.руб.};$$

$$M(U_1^*) = (1 - 0,1) \cdot 6074,76 = 5467,28 \text{ тыс. рос.руб.}$$

Вероятность локализации пожара при использовании установок локализации рассчитывали по формуле (4.44).

Коэффициент готовности установки – выполнить задачу (локализовать пожар) принимаем $k_T = 0,9$. Вероятность безотказной работы $P_{бр} = 0,95$. Вероятность успешной локализации пожара, связанная с готовностью установки поддерживать

заданные параметры водяной завесы, принимали $P_{\text{ЭТ}}^c = 0,99$. Коэффициент, характеризующий шахтные условия эксплуатации системы, $k_{\text{ш}} = 0,9$. Тогда

$$P_{\text{вз}}^{\text{yh}} = 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,99 \cdot 0,9 = 0,762..$$

Вероятность β'' , определяли по формуле:

$$\beta'' = \frac{P_{22} - P_{21}}{1 - P_{21}} = \frac{0,762 - 0,41}{1 - 0,41} = 0,60;$$

$$P_{32} = (1 - \beta'') P_{31} = (1 - 0,597) \cdot 0,30 = 0,12;$$

$$P_{42} = (1 - \beta'') P_{41} = (1 - 0,597) \cdot 0,30 = 0,12.$$

Поскольку $\bar{U}_{21} = \bar{U}_{22}$; $\bar{U}_{32} = \bar{U}_{31}$, то $\bar{U}_{42} = \bar{U}_{41}$;

$$M(\bar{U}_2) = 0,762 \cdot 60,72 + 0,12 \cdot 1130,06 + 0,12 \cdot 19038,26 = 2466,45 \text{ тыс. рос.руб.};$$

$$M(U_2^1) = 0,1 \cdot 2466,45 = 246,64 \text{ тыс. рос.руб.};$$

$$M(U_2^k) = (1 - 0,1) \cdot 2466,45 = 2219,80 \text{ тыс. рос.руб.}$$

Результаты расчета приведены таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Экономический ущерб от пожаров в горных выработках угольных шахт

Показатель	Категория тяжести последствий пожаров			Математическое ожидание ущерба от одного пожара, тыс. рос. руб.
	II	III	IV	
Базовый вариант				
Вероятность	0,40	0,30	0,30	-
Ущерб от пожара, тыс. рос. руб.	60,72	1130,06	19038,26	6074,76
Новый вариант				
Вероятность	0,762	0,12	0,12	-
Ущерб от одного пожара, тыс. рос. руб.	60,72	1130,06	19038,26	2466,45

При количестве действующих шахт $N_{\text{ш}} = 30$, число защищаемых объектов (конвейерных выработок, сопряжений лав с вентиляционными штреками) составляет $S = 160$ ед.

Среднегодовое число пожаров в выработках по данным таблицы 4.5 $N=80/10=8,0$. Принимаем, что в среднем в год оснащению установками локализации пожара подлежат 80 подземных объектов. Тогда $A_2^1=80$.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Исходные данные для расчета годового экономического эффекта использования вновь разработанных установок локализации пожара мелкораспыленной водой в горных выработках угольных шахт

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Базовый вариант	Новый вариант
Доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) изделий	P_1, P_2	-	-	0,15
Нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений	E_n	-	-	0,15
Текущие затраты на аварийно – восстановительные работы, связанные с ликвидацией последствий одного пожара	$M(U_1^T)$ $M(U_2^T)$	тыс. рос. руб.	607,74	246,64
Капитальные затраты на аварийно-восстановительные работы, связанные с ликвидацией последствий одного пожара	$M(U_1^K)$ $M(U_2^K)$	тыс. рос. руб.	5467,28	2219,8
Среднегодовое число пожаров	$N_{\text{пож}}$	ед.	8,0	8,0
Число защищаемых объектов	$S_{\text{об}}$	ед.	160	160
Число защищаемых объектов, рассчитанное исходя из годового объема их оснащения установками локализации пожара	A_2^1	ед.		80

Тогда годовой экономический эффект от применения результатов исследований в угольных шахтах составил

$$\begin{aligned}\mathfrak{Z}_r &= \frac{[M(U_1^T) + E_n M(U_1^K)] - [M(U_2^T) + E_n M(U_2^K)]}{P_2 + E_n} \frac{N}{S} A_2^1 = \\ &= \frac{[607,47 + 0,15 \cdot 5467,28] - [246,64 + 0,15 \cdot 2219,8]}{0,15 + 0,15} \cdot \frac{8,0}{160} \cdot 80 = 11398 \text{ тыс. рос.руб.}\end{aligned}$$

На одну шахту $\mathfrak{Z}_r^{\text{ш}} = \frac{\mathfrak{Z}_r}{N_{\text{ш}}} = 379,9 \text{ тыс. рос. руб.}$

Социальный эффект полученных результатов выполненных исследований заключался в том, что на основании применения разработанной установки локализации пожара мелкораспыленной водой может быть снижено количество осложнившихся пожаров на различных объектах (забои очистных и подготовительных выработок, лавы и их сопряжения, конвейерные выработки и т.д.) и влияние опасных факторов пожара на здоровье обслуживающего объект персонала и других горнорабочих шахты.

Вывод к разделу 4

1. Разработана методика расчета параметров локализации подземных пожаров, которая учитывает динамику пожара, гидравлические характеристики противопожарного трубопровода, распылителей, дисперсность завесы и баллистику капель в горной выработке. Методика включена в качестве приложения в «Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР».

2. Разработана установка локализации пожара, в конструкции которой, использованы центробежно-струйные распылители с усеченным конусоидальным вкладышем.

3. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил более 11 млн. рос. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно – техническая задача, имеющая важное теоретическое и практическое значение и заключающаяся в разработке параметров эффективной локализации пожаров в горных выработках угольных шахт с использованием мелкораспыленной воды.

Использование методики расчета локализации пожаров позволит успешно бороться с подземными пожарами, снизить количество осложнившихся и изолируемых пожаров, и таким образом уменьшить материальный ущерб от этого вида подземных аварий.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Существующие математические модели теплообмена капель мелкораспыленной воды с пожарными газами не учитывают изменение размера капель и коэффициента теплопроводности окружающей каплю газовой среды.

2. Разработана математическая модель процесса испарения капли в потоке пожарных газов, движущихся по горной выработке, учитывающая изменение размера капли и коэффициента теплопроводности парогазовой смеси, окружающей каплю.

Впервые установлено время полного испарения капель воды и снижение температуры газового потока, проходящего через завесу.

3. На основании теории баллистики испаряющихся капель разработана математическая модель движения капель в потоке нагретых пожарных газов в ограниченном поверхностью горной выработки пространстве, с учетом испарения капли, изменения ее размеров и силы аэродинамического сопротивления. Установлен новый показатель – коэффициент распределения воды K_p , как отношение количества испарившихся капель к количеству осевших на поверхность выработки.

4. Разработан центробежно-струйный распылитель, в конструкцию которого входит усеченный конусоидальный вкладыш, разделяющий водный поток на центральный и тангенциальные потоки. На основании изучения динамики водных

потоков в каналах распылителя и перераспределения кинетической энергии осевого и тангенциального потоков, энергии, затраченной на гидроудар и на раскручивание потоков при их смешивании, уточнен геометрический комплекс, учитывающий конструкцию и размеры распылителя, что позволило использовать для расчета диаметра образующихся капель скорректированное критериальное уравнение Пажи-Галустова.

5. Разработана и включена в «Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР» методика расчета параметров локализации подземных пожаров мелкораспыленной водой.

6. Оценен годовой экономический эффект от внедрения разработанной методики расчета, составляющий более 11 млн. рос. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживающих ГВГСС в угольной промышленности Украины за 2013 г. – Донецк – 2013. – 145с.
2. Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2016 г. – Донецк – 2016. – 60с.
3. Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2020 г. – Донецк – 2020. – 139с.
4. Козлюк, А.И. Исследования в области противопожарной защиты ленточных конвейеров / А.И. Козлюк, А.М. Кушнарев, Е.В. Курбацкий // Сборник докладов 24-й Международной конференции научно-исследовательских институтов по безопасности работ в горной промышленности. Донецк, 23 – 28 сентября 1991 г. Часть II. С.205-211.
5. Чумак, А.С. Пожарная безопасность горных выработок, оборудованных ленточными конвейерами / А.С. Чумак, Ю.Ф. Булгаков // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. – НИИГД., Донецк, 1996. – С.3-6.
6. Ющенко, Ю.Н. Локализация пожаров подземных объектах тонкораспыленной водой / Ю.Н. Ющенко // Науковий Вісник УКРНДІПБ. – 2001. – № 3. – С. 51-56.
7. Ющенко, Ю.Н. Эффективность водяных завес при тушении пожаров / Ю.Н. Ющенко, К.И. Поздняков // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. – НИИГД., Донецк, 1997. – С. 35-37.
8. Устав по организации и ведению горноспасательных работ ГВГСС МЧС ДНР. – Донецк, 2016. – 332с.
9. Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Украины. – Донецк, 2005. – 164с.
10. Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 304с.

11. Информационный материал по ходу ведения горноспасательных работ на шахте «Ясиновская-Глубокая» ГП «Макеевуголь», возникшей 07.01.06 г. в 20 час. 45 мин. – Макеевка, 2006. – 5с.

12. Информационный материал о ходе ведения работ по ликвидации аварии на шахте «Северная» ГП «Макеевуголь», возникшей в 11 часов 10 минут 22 февраля 2007 года. – Макеевка, 2007. – 10с.

13. Информационный материал о ходе ликвидации аварии «пожар», возникшей 20.04.11 в 15 час 37 мин на промежуточном квершлага (ВПШЗ-95) гор. 860 м СП «Шахта им. А.И. Гаевого ГП «Артемуголь». – Горловка, 2011. – 9с.

14. Информационный материал о ходе ведения работ по ликвидации аварии «пожар» в 37 откаточном штреке пл. h_8 на ОП ш/у «Ровеньковское» ООО «ДТЭК» «Ровенькиантрацит», произошедшей 22 октября 2012 года в 07 часов 40 минут. – Ровеньки, 2012. – 10с.

15. Информационный материал о ходе ликвидации аварии «пожар» на промквершлага (86-82) №2 гор. 700 м, произошедшего 17.04.2012 г. в 09 час. 35 мин на СП «Шахта «Углегорская» ГП «Орджоникидзеуголь». – Горловка, 2012. – 7с.

16. Информационный материал о ходе ликвидации аварии «пожар» в 12 западном вентиляционном штреке пл. k_5 на шахте №22 «Коммунарская» ПАО «ШАХТОУПРАВЛЕНИЕ «ДОНБАСС», произошедший 19.09.2013 года в 08 часов 36 минут. – Макеевка, 2013. – 17с.

17. Информационный материал о ходе ликвидации аварии «пожар» в 4 восточном штреке пл. k_6 ОП «Шахта имени Артема» ГП «Луганскуголь», возникшей 11.09.2013 года в 8 час. 20 мин. – Луганск, 2013. – 18с.

18. Информационный материал о ходе ведения работ по ликвидации аварии «пожар экзогенный» в конвейерной выработке 2-й западной лавы пласта l_7 блока 5 ПАО «ДТЭК ШАХТА КОМСОМОЛЕЦ ДОНБАССА», произошедшей 26 января 2014 года в 17 часов 04 минуты. – Торез, 2014. – 18с.

19. Информационный материал о ходе ведения аварийно-спасательных работ по ликвидации аварии «пожар», произошедшей в 162 «бис» лаве пл. C_6 гор. 300 м шахты «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО «ДТЭК

Павлоградуголь» в 06 часов 35 минут 04 сентября 2014 года. – Павлоград, 2014. – 14с.

20. Жидкостная установка пожаротушения = Spruiihflutanlage Sichert Brennkammerpriifstand Von Ariane 5 //Feverwerhrmann. – 1988. – №4.36.

21. Петрухин, П.М. Борьба с угольной пылью и породной пылью в шахтах / П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев и др./ – М.:Недра, 1981. – 271с.

22. Пажи, Д.Г. Форсунки в химической промышленности / Д.Г. Пажи, А.М. Прахов, Б.Б. Равиков /. – М.: Химия, 1971. – 222с.

23. Гродель, Г.С. Разработка унифицированных форсунок для пылеподавления / Г.С. Гродель, А.П. Коренев // Борьба с газом и пылью в угольных шахтах. – Донбасс-Макеевка: Рота-принт МакНИИ, 1969. – Вып. 5. – С.146-161.

24. Вакадзоне, И. Фунтай Когаку / И. Вакадзоне /. – 1969. – Т.6, №7. – С.80.

25. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика /Г.Н. Абрамович / – М.: Гостехиздат, 1958. – 348с.

26. Душкин, А.Л. Оптимизация параметров потоков тонкораспыленных огнетушащих веществ / А.Л. Душкин, А.В. Карпышев, М.Д. Сегаль // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Том 19. – №1. – С. 39- 44.

27. Луц, В.І. Тактико-технічні характеристики насадки-розприскувача для дрібнодисперсного розпорошення води з метою осадження продуктів горіння / В.І. Луц, П.І. Мельник // Журнал Пожежна безпека. – 2012. – № 21. – С. 111-114.

28. Денисов, А.Н. Глубина тушения пожара как основание для ресурсного обоснования сил и средств пожарных подразделений / А.Н. Денисов, Н.М. Журавлев, М.В. Шевцов, В.Б. Захаревский // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2011. – № 5 (39). – С. 1-9.

29. Тишин, Р.А. Разработка физико-математической модели и обоснование параметров устройства охлаждения воздуха капельной водой / Р.А. Тишин, И.А. Толкунов // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/8 (73). – С.48-54.

30. Болодьян, И.А. Параметры тушения горючих жидкостей распыленной водой / И.А. Болодьян, В.И. Горшков, А.И. Думилин // Научно-технический журнал ФГУ ВНИИ ГОЧС «Пожарная безопасность». – 2013. – № 2. – С. 30-37.

31. Дауэнгауэр, С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С.А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 13, №6. – С. 78-81.

32. Думилин, А.И. Тушение пламени горючих жидкостей охлаждением их поверхности распыленной водой / А.И. Думилин // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Том 22. – № 8. – С. 81-84.

33. Гого, В.Б. Математическая модель процесса и устройство гидродинамического охлаждения воздуха / В.Б. Гого, Д.В. Гого, В.А. Сыроватченко, Р.А. Тишин, И.А. Толкунов // Журнал «Научный обзор». – 2015. – № 9 (19). – С. 1-9.

34. Цирельман, Н.М. Моделирование процессов тепломассообмена при испарении капель воды в потоке воздуха ВУ ГТУ / Н.М. Цирельман, Р.Р. Мустафин // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13. – № 1 (34). – С. 20-25.

35. Полищук, Д.И. Испарение капель воды при температурах среды, превышающих температуру кипения / Д.И. Полищук // Журнал технической физики. – 1953. – Т. 23. – № 12. – С. 151-158.

36. Андрюшкин, А.Ю. Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением / А.Ю. Андрюшкин, М.Т. Пелех // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2012. – № 1. – С. 53-57.

37. Шрайбер, Г.М. Огнетушащие вещества: Химико-физические процессы при горении и тушении / Г.М. Шрайбер /. – М.: Стройиздат, 1975. – 240с.

38. Абросимов, Ю.Г. Противопожарное водоснабжение / Ю.Г. Абросимов, В.В. Жучков, А.А. Пименов, Ю.Л. Карасев, В.Д. Фоменко /. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008 – 311 с.

39. Глушков, Д.О. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде /

Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 12. – С. 531-538.

40. Стрижак, П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 8. – С. 26-31.

41. Волков Р.С. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 74-79.

42. Стрижак, П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукт сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 9. – С. 17-23.

43. Абрамов, Ю.А. Моделирование процессов в пожарных стволах / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, Е.А. Шаповалова /. – Харьков: Фолио, 2001 – 195с.

44. Безродный, И.Ф. Тушение пожаров водой аэрозольного распыла / И.Ф. Безродный, А.В. Шариков, В.Г. Кузьмин // Проблемы пожарной безопасности издании сооружений. Материалы 10 Всесоюзной научно-практической конференции. – М.: – ВНИИПО, 1990. – С.160-162.

45. Борович, А.М. Выбор оптимальных параметров распыленной воды для тушения горючих водонерастворимых жидкостей / А.М. Борович, А.Н. Корневский, А.В. Шариков /. – В кн.: Пожаротушение на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: Сб. науч. тр. М.: ВНИИПО, 1991.– С.58-63.

46. Былинкин, В.В. Анализ процесса тушения твердых горючих материалов распыленной водой. Пожаротушение на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / В.В. Былинкин, А.Ф. Шароварников: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1991. – С.66-73.

47. Пучков, С.И. О расчете параметров тушения пожаров горючих жидкостей распыленной водой / С.И. Пучков, А.А. Лебедев, В.Д. Филиппов // Теоретические и экспериментальные основы пожаротушения. М.:ВНИИПО, 1992. – С.14-18.

48. Виноградов, А.Г. Дослідження властивостей водяних завіс за допомогою програмного комплексу FLOWVISION / А.Г. Виноградов // Праці ТДАТУ – 2011. – Вип. 11. – Т. 1. – С. 192-199.

49. Елизаров, О.Н. Локализация и тушение пожара на выходах угольных пластов и рекультивация провалов шахты «Кадычанская» / О.Н. Елизаров, Н.П. Лавров, А.С. Хрулев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 1. – С. 218-219.

50. Виноградов, А.Г. Розрахунок векторного поля швидкостей крапель водяної завіси / А.Г. Виноградов // Вісник Кременчуцького держ. політех. університету. – 2008. – № 2 (49). – Ч. 2. – С. 42-44.

51. Луканин, В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. / – М.: Высш. школа, 1999. – 671 с.

52. Русак, А.М. Тепломассообмен капель жидкости с горящим твердотопливным зарядом / А.М. Русак, Н.М. Цирельман // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: Межвуз. научн. сб. Уфа: УГАТУ, 2002. – С. 184-188.

53. Ковалишин, В.В. Тепломассообменные процессы при тушении пожаров диспергированной водой в кабельных туннелях / В.В. Ковалишин // Научно-технический журнал ФГУ ВНИИ ГОЧС «Пожарная безопасность». – 2012. – № 1. – С. 85-89.

54. Цариченко, С.Г. Состояние вопроса использования тонкораспыленной воды при тушении пожаров / С.Г. Цариченко // Алгоритм безопасности. – 2003. – №2. – С.14-16.

55. Цариченко, С.Г. Некоторые вопросы пожаротушения тонкораспыленной водой / С.Г. Цариченко // Средства спасения и противопожарной защиты: Каталог. – М., 2004. – С.203-204.

56. Pietrzak L. Directions for Improving Manual Fire Suppression Using a Physically based Computer Simulation//Fire Technology. – Vol. 22., №3, August, 1986. – P. 184-209.

57. Ball J. Investigation to Improve the Effectiveness of Water in the suppression of Compartment Fire // Fire Research – 1978. – Vol.1., № 4-5. – P. 291-300.
58. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 5. – С. 74-78.
59. Шамонин, В.Г. Водяные завесы: расчет характеристик падающей и испаряющейся капли / В.Г. Шамонин, А.Н. Бородкин, П.А. Леончук, В.В. Луцкевич // Научно-технический журнал ФГУ ВНИИ ГОЧС «Пожарная безопасность». – 2010. – № 3. – С. 120-129.
60. Высокоморная, О.В. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «водяного снаряда» / О.В. Высокоморная, А.О. Марков, М.Н. Назаров, П.А. Стрижак, С.Р. Янов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 24-31.
61. Fuchsia P. Ein mathematisches Model bur Bestirring deer Loschwassermenge undo vergleich mit Experimental // VF dB Zeitschrift. – 1981. - №1. – S. 3-9.
62. Spray cooling in room fires // Yon Hong-Zeng Kung Hsiang-Ching, Han Zhankian 21 st. Int Symp. Combust. – Munich, Aug. 3-8, 1986.
63. Alpert R. 22 d Int. Symp. Combust. Seattle, Wash. , Aug. 14-19, 1988. – P. 343.
64. Chow W. On the Evaporation Effect of a Sprinkler Water Spray // Fire Technology. – 1989. – Vol. 25, November. – P. 364-373.
65. Gustin B. Fog streams and ppv: their effects on two fires // Fire Eng. – 1997. 150.#11. – P.49-55.
66. Hallons: Assessing The alternatives // Fire. Int. – 1996.#152. – P.29-30.
67. Huoneistopalon commuffaminen pienella vesi – maaralla // Palontorjuntatecnikka. – 1993. – 23.#2. – S.30-34.
68. Revolutionaren Quantensprung beim Loschmittel Wasser // Brandchutz/ – 1995. – 49, #8. – S. 534-537.
69. Smith D.P. Water mist Firesuppression on systems // Fire Safety Eng. – 1995. – 2, №2. – P. 100-115.

70. Mavhinney J.R. A review of water mist fire suppression research and development // Fire Technol. 2001. – 33. #1. P. 54-90.
71. Yao B. A review of water mist fire suppression // J. Appl. Fire Sci., 2001, №3. – P. 227-294.
72. Fuchs P. Brand-und Loschversuche mit verschiedenen Loschmitteln in Versuchsraum naturlider Grosse // Fire Protection. Seminar, Karlsruhe, Germany, VFDB, 1976.
73. Salzberg F. Water Requirements for Suppression of Room Fires // Fire Technology. – 1970. – Vol. 6. – P. 22.
74. В.П. Олышанський, С.В. Балістика крапель розпилених вогнегасних рідин / В.П. Олышанський, С.В. Олышанський, О.М. Ларін, Є.М. Фомін /. – Біла Церква: Вид. Пшонківський О.В., 2006. – 124 с.
75. Волинский, М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М.С. Волинский /. – М.: Знание, 1986 – 144с.
76. Лышевский, А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях / А.С. Лышевский /. – Л.: Судостроение, 1971. – 248с.
77. Тарахно, О.В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі / О.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов /. – Харків: АЦЗУ, 2004. – 252с.
78. Giffen E. The atomization of liquid fuels. London, 1953.
79. Jenkins D.C. The acceleration of water drops by airstream of constant relative velocity. London, 1961.
80. Биков, С.О. Розробка імпульсного вогнегасника для дальнього розпорошення вогнегасних речовин / С.О. Биков /. Дисертація кандидата технічних наук. – Харків: АПБ України, 2001. – 228с.
81. Кравчуновський, В.Ф. Пожарные стволы – краткий анализ существующих устройств для распыления жидкости, перспективность использования гидроимпульсных систем / В.Ф. Кравчуновський // Пожежна безпека: Збірник наукових праць. – Львів: ЛІПБ, 2002, №2. – С.73-76.
82. Hummol M. Erfahrungen mit «IFEX-3000» Impulsloschgerat [Текст] // Florian Hessen. – 1997. – #12. – S.26-27.

83. Еремин, В.И. Оценка использования переносного средства импульсной подачи мелкораспыленной воды для тушения пожаров / В.И. Еремин, С.М. Дымов, С.Г. Царыченко, С.В. Карпачев // Пожаровзрывобезопасность. – 1996. – №2. – С.23-24.

84. Смирнов, А.В. Проблемы оценки эффективности средств пожаротушения, основанных на применении распыленной жидкости / А.В. Смирнов // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – №3. – С.61-62.

85. Шаповалова, Е.А. Оценка достоверности при расчете дальности подачи огнетушащего вещества / Е.А. Шаповалова // Проблема пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Вып.7. – Харьков: Фолио, 2000. – С.227-229.

86. Цариченко, С.Г. Переносные и передвижные устройства пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащих веществ. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний / С.Г. Цариченко, В.А. Белинкин, С.М. Дымов /. – М.: ВНИИПО, 2003. – 51с.

87. Суворова, И.Г. Новые методы получения мелкодисперсного распыла воды / И.Г. Суворова, О.В. Кравченко, Я.В. Смирнов, С.С. Холобцев, В.О. Чеповский // Науковий вісник УкрНДІПБ: Наук. Журнал. – К., 2006. – №2(14). – С. 70-78.

88. Карпенчук, И.В. Методы расчета кавитационных сопел для получения мелкораспыленной воды или водного огнетушащего раствора / И.В. Карпенчук, С.Г. Петуховский // Науковий вісник УкрНДІПБ: Наук. Журнал. – К., 2007. – №2(14). – С. 70-78.

89. Грин, Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн /. – Ленинград: Химия, 1969. – 428с.

90. Лебедев, А.А. Теплофизические проблемы противопожарной защиты конструкций распыленной водой: Обзорная информация / А.А. Лебедев, С.И. Пучков, О.В. Надточий, Ю.А. Кошмаров /. – М.: ВНИИПО, 1991. – 90с.

91. Полищук, Д.И. Испарение капель воды при температурах среды, превышающих температуру кипения / Д.И. Полищук // Журнал технической физики, Т.23, вып. 12, 1953. – С.151-158.

92. Ito T. The Cooling of Hot Surfaces (Experiments of Fog Cooling) // *Memoirs of the Faculty of Engineering Kyushu University*. – 1988. – Vol.48, №4. – P.211-229.

93. Провести исследования по определению области применения тонкораспыленной (перегретой) воды и разработать рекомендации по тактике пожаротушения: Заключительный отчет ВНИИПО; Руководитель И.Ф. Безродный. – М., 1990. – 115 с.

94. Провести поисковые исследования по определению рациональных областей применения хладонов в пожаротушении: Отчет / ВНИИПО; Руководитель Д.И. Юрченко. – М., 1991. – 244 с.

95. Козлюк, А.И. Водоснабжение угольных шахт для борьбы с пожарами и пылью / А.И. Козлюк /. – М.: Недра, 1979. – 287 с.

96. Козлюк, А.И. Противопожарная защита угольных шахт / А.И. Козлюк /. – К.: Техніка, 1980. – 155 с.

97. Рабинович, Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович /. – М.: Недра, 1980. – 309 с.

98. Большаков, В.А. Гидравлика. Общий курс / В.А. Большаков, В.Н. Попов /. Учебник для высш. учебн. заведений. – Киев: Вища школа, 1989. – 215 с.

99. Тарасов-Агалаков, Н.А. Практическая гидравлика в пожарном деле / Н.А. Тарасов-Агалаков /. – М.: Из-во министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1959. – 262 с.

100. Ющенко, Ю.Н. Метод расчета параметров систем пожарного водоснабжения горных выработок / Ю.Н. Ющенко, К.И. Лапин // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2003. – Вып. 40. – С. 26-32.

101. Лапин, К.И. Процесс развития подземных пожаров и требования к средствам их тушения / К.И. Лапин, А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 46-53.

102. Пеклов, А.А. Кондиционирование воздуха / А.А. Пеклов, Т.А. Степанова /. – Киев: Высшая школа, 1978. – 326 с.

103. Установки попередження та гасіння пожеж водою автоматичні. Загальні технічні вимоги: ГСТУ 29.2.04675545.004-2001. – Київ: Мінпаливенерго України, 2001. – 24 с.

104. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахметов /. Под ред.. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
105. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Мукомел /. – М. –Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
106. Грицына, И.Н. Математическая модель движения капельного потока огнетушащей жидкости / И.Н. Грицына // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Вып. 3. – Харьков: ХИПБ, 1998. – С.55-57.
107. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность . –2012. –Том 21. –№5. – С.74-77.
108. Олышанский, В.П. Балістика крапель розпиленних вогнегасних рідин / В.П. Олышанский, С.В. Олышанский, О.М. Ларин, Є.М. Фомін /. – Біла Церква: ХНТУСГ, 2006. – 123 с.
109. Коляда, А.Ю. Параметры водяной завесы при локализации подземного пожара / А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45 – С. 72-81.
110. Идельчик, И.Е. Гидравлические сопротивления / И.Е. Идельчик /. Государственное энергетическое издательство. Москва – 1954.
111. Бородин, В.А. Распыливание жидкостей / В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.И. Ягодкин /. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1967. – 208 с.
112. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов / Л.Г. Лойцянский /. – 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
113. Коляда, А.Ю. Процесс распыления жидкости центробежно-струйной форсункой с усеченным конусоидальным вкладышем / А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50 – С. 145-152.
114. Пажи, Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов /. – М.: Химия, 1984. – 254 с.

115. Альтшуль, Л.Д. Гидравлика и аэродинамика / Л.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев /. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.

116. Коляда, А.Ю. Методика расчета параметров локализации пожаров в горных выработках / А.Ю. Коляда, Ю.Н. Ющенко, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. – Донецк, 2015. – Вып. 52 – С. 99-112.

117. Автоматическая установка водяного пожаротушения ленточного конвейера АУВП «ЮРЭК-6». – Руководство по эксплуатации и паспорт. – Северодонецк, 2005 – 16 с.

118. Методические указания по определению экономической эффективности использования в угольной промышленности новой техники, связанной с предупреждением и тушением подземных пожаров. Утв. Минуглепромом СССР от 28.11.1980. – М., 1981. – 114 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования
на СП «Шахта им. В.И. Ленина ГП Артемуголь»