

*На правах рукописи*



**Гусев Иван Александрович**

**ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТУШЕНИЯ  
ПОЖАРОВ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
(технические науки, отрасль энергетика)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре пожарной техники (в составе учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники) Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

**Научный руководитель:** **Алешков Михаил Владимирович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ  
ВО Академии ГПС МЧС России,  
заместитель начальника по научной работе

**Официальные оппоненты:** **Качанов Сергей Алексеевич**  
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий)», заместитель начальника по научной работе

**Волгина Людмила Всеволодовна**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2018 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 при Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

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

<http://academygps.ru/upload/iblock/3d0/3d06ebf30737ec55dbb622650c4eabff.pdf>

Автореферат разослан «19» октября 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



А.Б. Сивенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Энергетика Российской Федерации является ключевой отраслью экономики, обеспечивающей потребности государства в электроэнергии. Объекты энергетики ввиду своих особенностей подвержены возникновению пожаров и аварий, в результате которых образуются условия, опасные для участников тушения пожаров.

Анализ статистических данных о пожарах и авариях, происшедших на объектах энергетики за период с 2005 по 2016 гг., показал, что они довольно часто приводят к травмированию и гибели людей, возникновению экологического и материального ущерба, как прямого, так и косвенного характера. При тушении пожаров на объектах энергетики, помимо воздействия на личный состав опасных факторов пожара, могут возникать и события, при которых происходит обрушение строительных конструкций на обширных площадях, взрывы емкостей, находящихся под давлением, поражения электрическим током и др. Все это неуклонно влияет на процесс тушения пожара, который приходится прерывать, отводя силы и средства на безопасные расстояния, что приводит к распространению пожара.

В связи с этим для эффективного тушения пожаров на объектах энергетики в условиях возникающих угроз предлагается применение мобильной робототехники пожаротушения, разработке которой и посвящена настоящая работа.

**Степень разработанности темы исследования.** Обеспечение пожарной безопасности объектов энергетики всегда было одной из наиболее значимых тем научных исследований. Большой вклад в этом направлении внесли: Микеев А.К., Алешков М.В., Лобанова Н.А., Двоенко О.В., Ольховский И.А. и др. Все они занимались вопросами обеспечения пожарной безопасности объектов энергетического комплекса, при этом рассматривали как комплексные подходы, так и частные, выражающиеся в исследованиях и создании специальных образцов пожарной техники и разработке противопожарных мероприятий.

Исследованиями в области разработки и применения при тушении пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций мобильной робототехники занимались многие специалисты и научные коллективы. Отдельно хотелось бы выделить: Цариченко С.Г., Годосейчука С.П., Северова Н.В., Власова К.С. и др.

Однако, анализ результатов рассматриваемых исследований показал, что, вопрос применения мобильной робототехники для тушения пожаров на объектах энергетики практически не исследован, отсутствует специально разработанная для этих целей робототехника и практически полностью отсутствует методическая база, связанная с технологией ее эффективного применения.

В связи с этим **целью исследования** является обоснование применения мобильных робототехнических средств для тушения пожаров на объектах энергетики.

Для достижения поставленной цели необходимо **решить ряд задач:**

1) провести анализ пожаров и аварий, произошедших на объектах энергетики и выявить особенности их тушения;

2) провести исследования и обосновать параметры, влияющие на тактико-технические характеристики робототехнического средства пожаротушения, разрабатываемого для объектов энергетики;

3) провести исследования гидравлических характеристик систем подачи огнетушащих веществ, интегрированных в конструкцию робототехнического средства пожаротушения;

4) обосновать параметры и разработать опытный образец мобильного робототехнического средства применимого для пожаротушения на объектах энергетики;

5) разработать тактические приемы использования мобильных робототехнических средств для тушения пожаров на объектах энергетики.

**Информационными основами исследования** являются статистические данные по пожарам, произошедшим на объектах энергетики, а также данные научно-исследовательских работ, связанных с разработкой и применением мобильной робототехники при тушении пожаров.

**Объектом исследования** является тушение пожара на объектах энергетики.

В качестве **предмета исследования** рассматривается применение мобильных робототехнических средств для тушения пожаров на объектах энергетики.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

– научно обоснована целесообразность применения мобильной робототехники для тушения пожаров на объектах энергетики;

– впервые определены токи утечки по струе смеси воды и абразива;

– обоснованы математические зависимости по определению тока утечки по струе воды и смеси воды с абразивом в зависимости от расстояния и напряжения;

– разработан измерительный комплекс для определения гидравлических характеристик установок пожаротушения с гидроабразивной резкой, интегрированных в конструкцию робототехнического средства;

– определены гидравлические характеристики насосно-рукавных систем установок пожаротушения с гидроабразивной резкой;

– обоснованы требования к конструкции и разработан опытный образец мобильного робототехнического средства, предназначенного для тушения пожаров на объектах энергетики;

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что получены данные и математические зависимости, позволяющие оценить тактико-технические характеристики мобильной робототехники пожаротушения в зависимости от условий ее применения.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основании полученных результатов был разработан опытный образец мобильного робототехнического средства пожаротушения и методическое пособие, раскрывающее возможности эффективного применения мобильных робототехнических средств для тушения пожаров на объектах энергетики.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы методы теории гидравлики, трения и электропроводности, методы математического анализа и физический эксперимент.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика и результаты исследования по определению значений тока утечки по струе воды и смеси воды с абразивом;
- математические зависимости для определения величины тока утечки по струе воды и смеси в зависимости от расстояния и напряжения;
- результаты исследования тяговых характеристик мобильной робототехники при перемещении пожарных напорных рукавов;
- методика и результаты исследования гидравлических характеристик рукавов высокого давления, применяемых в установках пожаротушения по которым транспортируется вода и смесь воды и абразивных частиц, для целей гидроабразивной резки и пожаротушения;
- научно обоснованные требования к конструкции робототехнического средства пожаротушения, применимого на объектах энергетики.

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

**Материалы диссертации реализованы при:**

- разработке пособия по технологии применения робототехнических комплексов для пожаротушения на объектах атомной энергетики (МЧС России, 2017);
- разработке методических рекомендаций по тактике применения автомобилей, оборудованных установками пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки (ГУ МЧС России по г. Москве, 2017);
- проведении экспериментального исследования по определению возможности применения установок пожаротушения с системой гидроабразивной резки при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением до 30 кВ (ООО «Объединенные спасательные технологии», 2016);
- разработке методики проведения приемочных испытаний дистанционно-управляемой роботизированной установки пожаротушения малого класса (АО «ВзППСО», 2017);
- разработке многофункционального мобильного робототехнического комплекса РТС-РХ-Л1 (ЗАО НПО «Курганский завод СпецТехники», 2017);
- проведении экспериментального исследования по определению возможностей мобильного комплекса, оборудованного установкой пожаротушения с системой гидроабразивной резки (ООО «ТК Пожснаб», 2016);
- выполнении научно-исследовательской работы «Применение робототехнических комплексов для обеспечения технологии пожаротушения на объектах атомной энергетики», п. 1.3-7/Б2 Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МЧС России на 2016 год, утвержденного приказом МЧС России от 14.04.2016 №188 ДСП.

### **Апробация результатов исследования:**

Основные результаты работы были доложены на:

- IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Воронеж, Воронежский институт ГПС МЧС России, 2015 г.);
- X Международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов, (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктуры (г. Минск, КИИ МЧС Республики Беларусь, 2016 г.);
- V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016 г.);
- 5-й Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации – 2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016 г.);
- 10-й Международной научно-практической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (г. Москва, ЭНИЦ, 2016 г.);
- VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017 г.);
- 26-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017 г.);
- 6-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018 г.);
- VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2018» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018 г.).

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержание работы изложено на 215 страницах машинописного текста, включает в себя 25 таблиц, 65 рисунков, список использованной литературы из 138 наименований и 8 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Показаны научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов работы.

**В первой главе** диссертации «Особенности тушения пожаров на объектах энергетики» представлены результаты анализа статистических данных по пожарам и авариям, произошедшим на объектах энергетики за период с 2005 по

2016 г., особенности развития и применения мобильной робототехники при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ, а также анализ исследований в области создания и применения мобильной робототехники для нужд МЧС России и обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики за счет разработки специальных технических устройств.

Пожары, возникающие на объектах энергетики, относятся к сложным, с точки зрения тактики тушения, пожарам, при которых в короткие сроки, возникают условия, опасные для работы личного состава пожарно-спасательных подразделений. Несмотря на современный уровень безопасности, объекты энергетики подвержены возникновению пожаров и аварий, основной причиной которых являются пожары на электрооборудовании, возникающие в результате коротких замыканий и перегрузок и составляющие 37% от общего количества.

В результате анализа статистических данных по пожарам, произошедшим на объектах энергетики, было установлено, что за период с 2005 по 2016 г. на объектах энергетики произошло 5057 пожаров, в результате которых погибло 92 человека, 176 человек получили травмы, а материальный ущерб составил около 2,5 млрд. рублей.

Местом возникновения наибольшего числа пожаров являются машинные залы электростанций. Связано это с наличием большого количества горючей нагрузки и возможности образования источников зажигания. Пожары в машинных залах характеризуются быстрым развитием, могут сопровождаться взрывами емкостей под давлением, факельным горением водорода, находящимся в системе охлаждения турбин, горением машинного масла на большой площади и на различных высотных отметках, обрушением кровли на обширных площадях, плотным задымлением, поражением электрическим током и др.

Особенностью тушения пожаров на объектах энергетики является возможность тушения пожаров электрооборудования под напряжением, в виду того, что часть электрооборудования невозможно обесточить исходя из условий безопасного функционирования энергообъекта. Действия личного состава при тушении электрооборудования строго регламентированы, а в большинстве случаев запрещены, если напряжение на токоведущих частях горящего электрооборудования превышает 0,4 кВ.

В связи с этим для тушения пожаров в условиях возникающих угроз предлагается применять мобильную робототехнику пожаротушения.

Началом развития и применения мобильной робототехники при тушении пожаров и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций принято считать чернобыльскую аварию, для ликвидации которой в короткие сроки были созданы образцы мобильной робототехники, применяемые для дегазации и дезактивацией местности, очисткой кровли от радиоактивных обломком, замеров уровня радиации и пр. Применение мобильной робототехники при ликвидации последствий чернобыльской аварии показало перспективность развития этого направления, ведь за счет замены людей на робототехнические средства удалось выполнить большой объем работ, тем самым сохранив десятки человеческих жизней.

Анализ результатов исследований, выполненных в области обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики, позволяет сделать вывод, что ввиду специфики объектов и возникающих при тушении пожаров особенностей для эффективной борьбы с пожарами необходима разработка специальных технических устройств, в том числе и робототехнических средств (РТС).

Проведенный анализ существующих образцов мобильной робототехники пожаротушения, находящихся в подразделениях МЧС России позволяет сделать вывод, что ее невозможно в полной мере применять на объектах энергетики.

В связи с этим необходима разработка и создание образца мобильной робототехники, предназначенного для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ на объектах энергетики, а также методики его эффективно-го применения.

Для создания робототехнического средства пожаротушения, применимого на объектах энергетики необходимо провести исследования, в рамках которых подобрать огнетушащие составы и средства их подачи, определить параметры, влияющие на тактические возможности разрабатываемой робототехники, сформировать требования к конструкции РТС, которые позволят создать его опытный образец.

**Во второй главе** диссертации «Обоснование параметров мобильной робототехники пожаротушения при ее использовании на объектах энергетики» рассмотрены огнетушащие составы и средства их подачи, наиболее подходящие для целей пожаротушения на объектах энергетики, произведен подбор огнетушащего вещества и средства его подачи, приведены результаты экспериментального исследования на предмет возможности тушения пожаров электрооборудования под напряжением выбранными огнетушащими средствами при совместном их применении с робототехникой, а также результаты исследований по определению тактических возможностей мобильной робототехники при прокладке рукавных линий.

Пожары, происходящие на объектах энергетики, в короткие сроки могут достигать больших размеров. Исходя из тактики тушения пожаров на объектах энергетики, робототехническое средство должно обеспечивать подачу огнетушащих веществ с интенсивностью не менее  $0,2 \text{ л}/(\text{м}^2 \text{ с})$ . Учитывая это условие, а также исходя из тактических соображений, для робототехнического средства пожаротушения необходимо предусмотреть дистанционно управляемый лафетный ствол с расходом огнетушащих веществ от 15 до 20 л/с, с дальностью подачи огнетушащих веществ не менее 50 м и с возможностью формирования сплошной и распыленной струи воды.

Дистанционно-управляемый лафетный ствол, предусмотренный в конструкции робототехнического средства, обеспечивает тушение крупных пожаров за счет подачи большого количества огнетушащих веществ в очаг пожара, но для тушения пожаров электрооборудования под напряжением выбранное средство тушения не может быть применимо, в виду хорошей электропроводимости струи. Следовательно, необходимо предусмотреть дополнительное сред-



ство пожаротушения, позволяющее осуществлять тушение пожаров электрооборудования, находящегося под напряжением.

Для подбора огнетушащего состава и средства его подачи, необходимых для тушения пожаров электрооборудования, находящегося под напряжением, был проведен анализ огнетушащих средств.

По результатам проведенного анализа было установлено, что наиболее подходящим для этих целей огнетушащим составом является тонкораспыленная вода, со средним диаметром капель менее 200 мкм, а в качестве средства ее подачи была выбрана установка пожаротушения с гидроабразивной резкой.

Основным преимуществом установки пожаротушения с гидроабразивной резкой является возможность проведения как поверхностного, так и локально-объемного пожаротушения. Подача огнетушащих веществ в горящий объем может осуществляться через оградительные строительные конструкции за счет их резки потоком жидкости и абразива. Огнетушащий эффект от применения установки достигается тем, что капли, средний диаметр которых составляет около 170 мкм, попадая в зону с высокой температурой интенсивно испаряются, отводя от зоны горения большое количество теплоты. При этом до 90% всех капель, попавших в зону горения, испаряется, и только 10% превращается в «бесполезную» воду, падая на пол. Возможности гидроабразивной резки позволяют проводить аварийно-спасательные работы даже в условиях образования взрывоопасных концентраций.

Для определения возможности применения рассматриваемой установки пожаротушения при тушении пожаров электрооборудования под напряжением при помощи робототехнических средств, а также личным составом пожарно-спасательных подразделений было проведено экспериментальное исследование по определению возникающих значений токов утечки по струям огнетушащих веществ в виде воды и смеси воды и абразива (смеси).

Экспериментальное исследование проводилось на специальном стенде, позволяющем оценить значения возникающих токов утечки в зависимости от напряжения на мишени стенда и расстояния до нее. Замеры значений тока утечки по струям воды и смеси производились на расстояниях 0,5 м, 1 м, 2 м, 3 м при напряжениях 10 кВ, 20 кВ, 30 кВ на каждом из расстояний.

За исходный параметр тока утечки принимали значение 0,5 мА, при котором человек начинает воспринимать болевые ощущения.

В результате проведенного экспериментального исследования был получен массив данных, при математической обработке которого были выведены математические зависимости, позволяющие определить значения возникающих токов утечки в зависимости от расстояния и напряжения на мишени для воды и смеси.

– для воды:

$$I = \frac{24,05 \cdot U^{0,9}}{L^{0,95}}; \quad (1)$$

– для смеси воды и абразива:

$$I = \frac{8,17 \cdot U^{1,1}}{L^{0,8}}, \quad (2)$$

где  $I$  – возникающий ток утечки, мкА,  $U$  – напряжение на мишени, кВ,  $L$  – расстояние от ствола до мишени, м.

По полученным зависимостям были определены расстояния, при которых возможно применение установок пожаротушения с гидроабразивной резкой личным составом пожарно-спасательных подразделений при тушении пожаров электрооборудования под напряжением (рисунок 1).

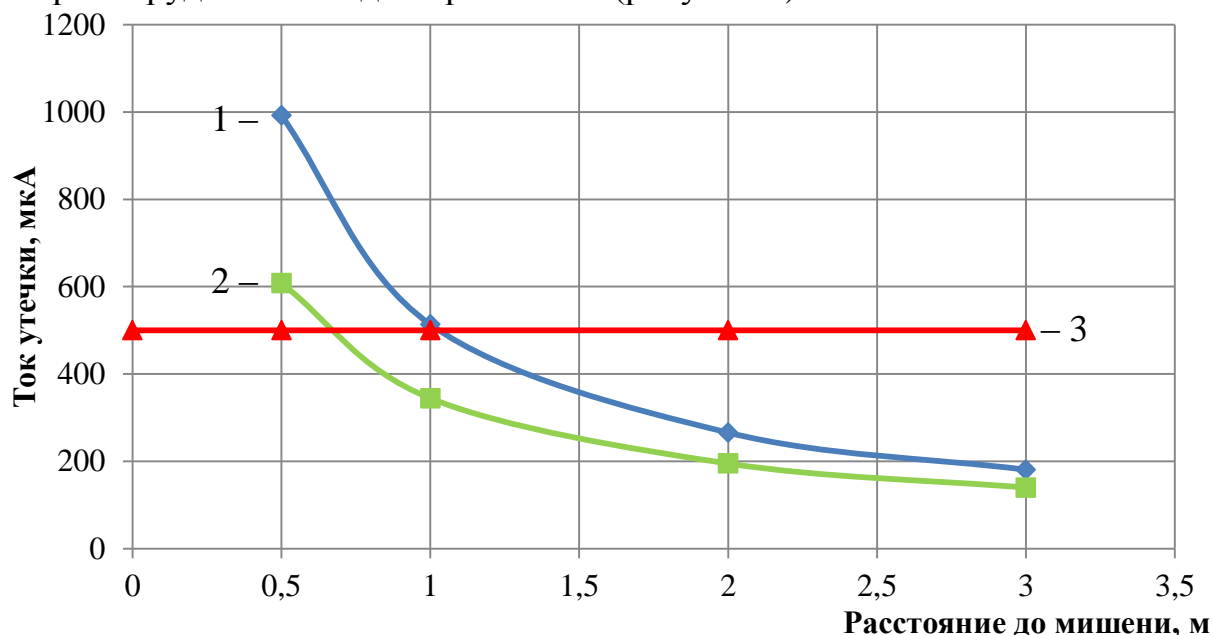


Рисунок 1 – Значения тока утечки для воды и смеси при напряжении 30кВ:  
1 – зависимость тока утечки для воды; 2 – зависимость тока утечки для смеси;  
3 – значение тока утечки, ощутимое для человека

По рисунку 1 отчетливо наблюдается, что значения токов утечки по смеси меньше значений, полученных по воде. Связано это с возникновением перколяционных эффектов, характеризующих протекание электричества через смесь воды и абразивных частиц. В виду того, что абразив представляет собой смесь частиц ( $(\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ;  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), обладающих худшей электропроводностью по сравнению с водой, а их процентное содержание в смеси составляет 4% по объему от общего количества, то полученная в результате смесь воды и абразивных частиц хуже проводит электрический ток, по сравнению со струей тонкораспыленной воды, что и было получено в ходе проведения экспериментального исследования.

Исходя из тактических соображений, а также учитывая требования правил охраны труда, наиболее оптимальным вариантом подачи огнетушащих веществ при тушении пожаров на электрооборудовании при использовании личным составом установок пожаротушения является расстояние не менее 3 м, что

позволяет также учесть обратную реакцию струи. Робототехническое средство, оснащаемое стволом установки пожаротушения, может проводить работы по тушению пожаров с расстояния 0,5 м, при этом в его конструкции необходимо предусмотреть защиту от возникающих токов утечки.

Разработка робототехнического средства для объектов энергетики подразумевает его применение не только на открытых площадках, но и практически во всех помещениях электростанции, что может быть достигнуто уменьшением габаритных размеров и полной массы. В связи с этим робототехническое средство не будет иметь собственного запаса огнетушащих веществ, а обеспечение лафетного ствола огнетушащими веществами будет осуществляться через рукавные линии.

Процесс прокладки рукавных линий сопровождается возникновением сил, препятствующих свободному перемещению рукава по различным поверхностям, основной из которых является сила трения.

Механизм трения рукавов о поверхность, по которой он транспортируется, достаточно сложен, в виду того, что в трении участвуют два совершенно разных материала – металл и полимер. Имеются три основных отличия трения полимеров от трения металлов. Первым отличием является то, что площадь соприкосновения трущихся поверхностей зависит от геометрии этих поверхностей и от нагрузки, что влияет на силу трения. Второе отличие выражается в том, что деформационная составляющая может составлять большую часть силы трения, проявляясь в форме упругого гистерезиса. Третьим отличием является то, что в виду вязкоупругих свойств полимеров трение зависит от скорости и температуры. Но исходя с практической точки зрения рассматривалась полная сила трения, возникающая при прокладке рукавных линий, являющейся суммой сил трения полимеров и металлов о твердые тела.

Основу напольного покрытия на объектах энергетики составляют наливные полы, представляющие собой эпоксидное покрытие для бетона, плитка и асфальт. В ходе проведения экспериментального исследования по определению возникающей силы трения, которую необходимо преодолеть при транспортировке рукавных линий рассматривались именно эти поверхности. Рукавная линия состояла из пожарных рукавов общего исполнения.

В результате проведенного исследования был получен массив данных по силам трения, которые возникают при перемещении рукавных линий различных диаметров по рассматриваемым напольным покрытиям, при обработке которого расчетным методом были получены коэффициенты трения, характеризующие трение рукавных линий о рассматриваемые поверхности.

Таблица 1 – Значение коэффициентов трения рукавов для трех поверхностей

Диаметр условного прохода рукава, мм	Вид поверхности		
	Наливной пол	Плиточное покрытие	Асфальт
50	0,27	0,36	0,58
65			
80			

При проведении экспериментального исследования наблюдались скачкообразные перемещения рукавной линии при малой скорости относительно исследуемой поверхности. Это явление характеризуется автоколебательным процессом, в результате которого динамометр показывает скачкообразные значения силы трения.

Для более точной оценки тактических возможностей мобильной робототехники при прокладке рукавных линий, а также учитывая возникновение автоколебательных явлений был получен коэффициент запаса 1.1.

С учетом коэффициента запаса, формула для определения возникающих сил трения приобретает вид:

$$F = 1,1 \cdot \mu \cdot m_0 \cdot N \cdot g, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $m_0$  – масса рукава, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ,  $N$  – количество рукавов, шт.

При сравнении экспериментальных данных с расчетными было установлено, что экспериментальные данные находятся в заданном интервале, а их погрешность не превышает 10%.

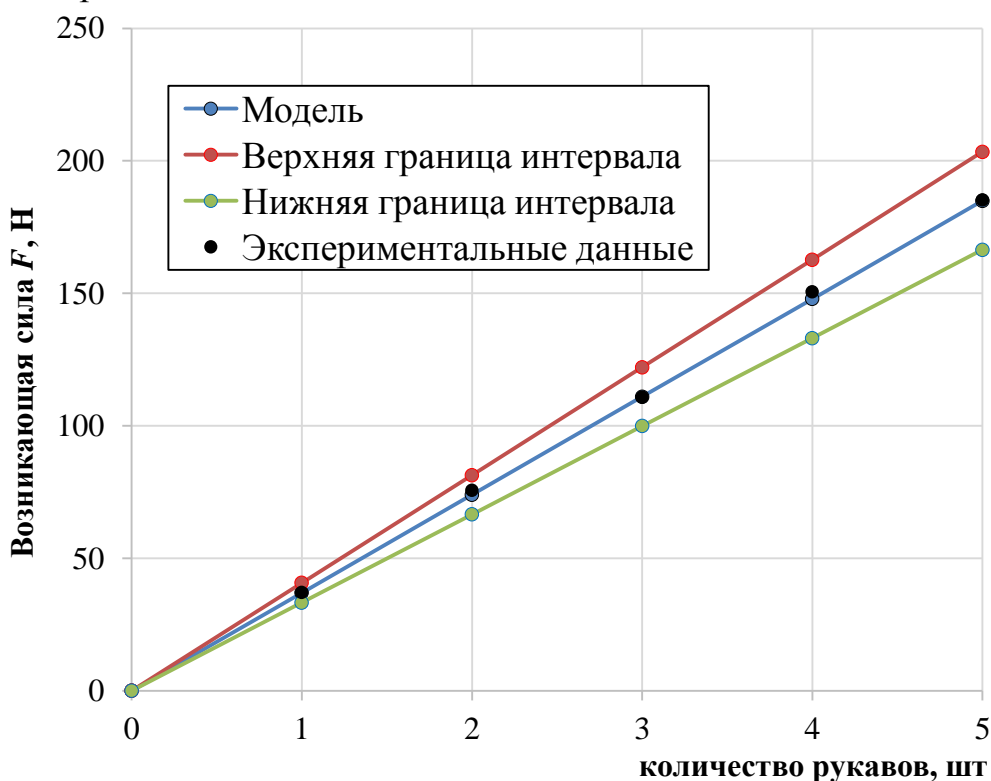


Рисунок 2 – Сравнение расчетных данных по силе трения с экспериментальными для рукавов с диаметром условного прохода 50 мм, полученных для асфальтированной поверхности

Для оценки тяговых характеристик, которыми должно обладать разрабатываемое робототехническое средство, были рассмотрены тактические приемы подачи огнетушащих веществ в зависимости от расхода огнетушащего вещества и способа прокладки рукавной линии. Наиболее рациональным способом является подача огнетушащих веществ с расходом 15 л/с на расстояние около 230 м при использовании рукавной линии с диаметром условного прохода

80 мм. Количество рукавов в линии составляет 14 шт., для перемещения которых требуется создать усилие равное 964 Н.

Следовательно, для перемещения рукавных линий, различных диаметров, конструкция разрабатываемого робототехнического средства должна обладать тяговыми усилиями не менее 1000 Н (~100 кг), что обеспечит эффективное перемещение РТС с рукавными линиями при выходе на позицию подачи огнетушащих веществ.

**В третьей главе** диссертации «Исследование тактических особенностей установок пожаротушения с гидроабразивной резкой при подаче огнетушащих веществ» рассмотрены особенности, влияющие на предельную дальность подачи огнетушащих веществ, разработан измерительный комплекс и приведены результаты расчетного и экспериментального определения потерь напора, влияющего на дальность подачи.

Тактические возможности установок пожаротушения во многом зависят от предельной дальности подачи огнетушащих веществ, в особенности если планируется их использование совместно с мобильной робототехникой. Предельная дальность подачи огнетушащих веществ определяется в зависимости от напорно-расходных характеристик средств тушения и потерь напора при транспортировке огнетушащих веществ.

Потери напора принято разделять на местные и линейные потери. Линейные потери напора  $h_l$  возникают при транспортировании огнетушащих веществ по трубопроводу в результате трения потока жидкости о стенку трубы (чехол рукава) и между собой. Местные потери напора  $h_m$  возникают в местах деформации потока. Общая же величина потерь напора представляет собой сумму местных и линейных потерь напора.

$$h_{\text{общ}} = h_l + \sum h_m. \quad (4)$$

Основной же формулой, для расчета потерь напора по длине при установившемся движении потока для круглых труб, является формула Дарси-Вейсбаха, которая имеет вид:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $l$  – длина трубопровода, м;  $d$  – диаметр живого сечения, м;  $v$  – средняя скорость потока жидкости, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Основным критерием, характеризующим потери напора при транспортировке огнетушащих веществ, является коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ .

До недавнего времени считалось, что  $\lambda$  является величиной постоянной, но позже было установлена ее зависимость от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости стенок  $\varepsilon = \Delta/d$  (где  $\Delta$  – абсолютная шероховатость, равная средней высоте выступов шероховатости, а  $d$  – диаметр трубопровода).

Существующие на сегодняшний день формулы для определения коэффициента гидравлического трения были получены, а позже и апробированы экспериментальным путем при определенных условиях. В связи с этим для опре-

деления потерь напора требуется определить коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  при подаче огнетушащих веществ установками пожаротушения.

В установках пожаротушения с гидроабразивной резкой происходит транспортировка огнетушащих веществ как в виде воды, так и в виде смеси воды и абразива. При добавлении абразивных частиц в поток жидкости он видоизменяется и начинает представлять собой двухфазный поток, при транспортировке которого возникают дополнительные потери напора, связанные с переносом твердой фазы.

Потери напора в двухфазных потоках, как и в случае с водой, подразделяются на местные и линейные. Линейные потери напора представляют собой сумму потерь условно-однородной жидкости и дополнительных потерь, обусловленных наличием твердых частиц в потоке.

$$i_{см} = i_g + \Delta i, \quad (6)$$

где  $i_g$  – удельные потери напора при движении воды, м;

$\Delta i$  – дополнительные потери напора, м.

Удельные потери напора определяются по формуле Дарси-Вейсбаха (5), расчет дополнительных потерь напора производится по формуле 7.

$$\Delta i = \delta \sqrt[4]{j^3} \sqrt{C_0^2} \frac{V_{кр}}{V}, \quad (7)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние относительной крупности частиц по отношению к диаметру трубы  $d/D$ ;  $j$  – коэффициент разнозернистости твердых частиц;  $C_0$  – действительная объемная консистенция Н/м<sup>3</sup>;  $V_{кр}$  – критическая скорость движения смеси, при которой частицы начинают двигаться вдоль потока м/с;  $V$  – скорость потока м/с.

Величина удельных потерь напора при движении воды обуславливает точность оценки потерь напора всей смеси и зависит от коэффициента гидравлического трения. На дополнительные потери напора влияют многие факторы, в связи с этим определение потерь напора и характеризующих их факторов при транспортировке воды и смеси практичнее производить эмпирическим путем, тем более что рабочее давление в установках достигает 30 МПа.

Еще одним условием стабильной работы рассматриваемых систем является исключение седиментации твердых частиц при подаче смеси. Явление седиментации представляет собой процесс, при котором происходит оседание твердых частиц под действием гравитационного поля. Для исключения этого явления течение потока смеси должно быть турбулентным, что характеризуется числом Рейнольдса, зависящем от скорости потока.

Учитывая высокие показатели рабочего давления установок пожаротушения с гидроабразивной резкой, а также учитывая тот факт, что происходит транспортировка двухфазного суспензионного потока, для определения гидравлических потерь напора при транспортировке воды и смеси был разработан измерительный комплекс, возможности которого позволяют производить измерения избыточного давления в диапазоне от 0 до 40 МПа и работать с абразивными средами.

Была разработана методика проведения эксперимента, схема проведения эксперимента представлена на рисунке 3.

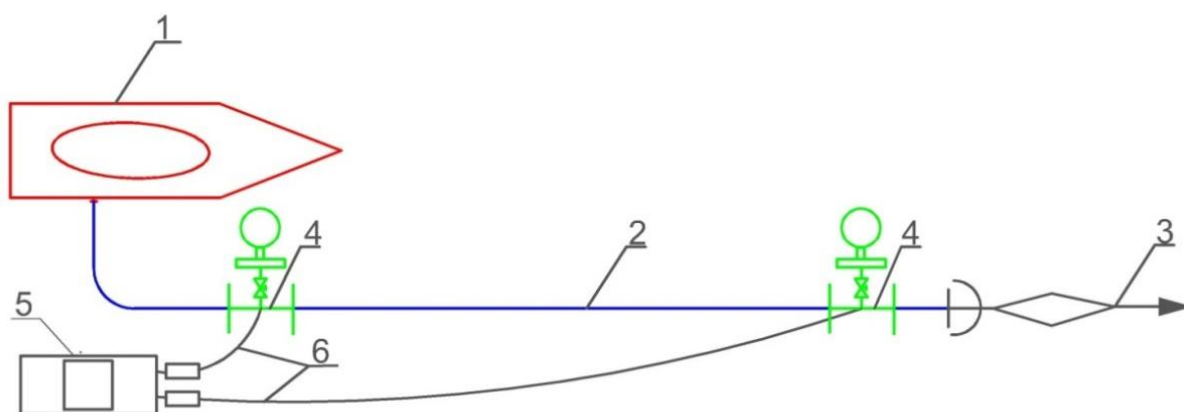


Рисунок 3 – Схема проведения экспериментального исследования:  
 1 – пожарный автомобиль с установкой гидроабразивной резкой, 2 – рукавная линия,  
 3 – ствол установки, 4 – рукавные вставки с преобразователями давления, 5 – регистратор технологический многоканальный РТМ 59, 6 – соединительные кабельные линии

Экспериментальное исследование проводилось с рукавной линией, проложенной прямолинейно, и с изогнутой линией для образования условий, приближенных к рабочим на пожаре. В результате проведенного эксперимента были получены значения гидравлических потерь напора при транспортировке воды и смеси.

Определение коэффициента гидравлического трения на основании экспериментальных данных производилось по формуле, полученной из уравнения Бернулли.

$$\lambda^3 = \Delta h_s \cdot \frac{d}{l} \cdot \frac{2g}{v^2}, \quad (8)$$

$$\Delta h_s = \frac{\Delta P}{\rho g}, \quad (9)$$

где  $\Delta P$  – потери давления Па;  $\rho$  – плотности воды, кг/м<sup>3</sup>;

Значение коэффициента гидравлического трения  $\lambda^3$  при транспортировке воды составило 0,019. Полученное значение числа Рейнольдса находится в пределах  $20000 < Re < 100000$ , что соответствует области гидравлически гладких труб, а коэффициент гидравлического трения может быть определен по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (10)$$

Значение коэффициента гидравлического трения, полученного по формуле Блазиуса, составило  $\lambda_{теор} = 0,0191$ , что согласуется со значением, полученным экспериментальным путем.

По результатам проведенного экспериментального исследования была определена предельная дальность подачи воды установкой пожаротушения, которая составила 317 м, при условии, что давление перед стволом должно быть не менее 22 МПа. Для упрощения расчетов насосно-рукавных систем были

определены значения гидравлических сопротивлений для рукавных катушек длиной 40 и 80 м, которые составили  $S_p^{40} = 252,622 \text{ (с/л)}^2\text{м}$  и  $S_p^{80} = 505,24 \text{ (с/л)}^2\text{м}$  соответственно.

Дополнительные потери напора, возникающие при транспортировке твердых частиц, составили  $\Delta i = 0,0056 \text{ м}$  с одного метра рукавной линии.

Полученное расчетным методом значение потерь напора при транспортировке смеси по рукавной линии длиной 80 м составляет 2,763 МПа, погрешность которого относительно экспериментального значения не превышает 6%, что говорит об адекватности описанного процесса. Максимальная дальность подачи огнетушащих веществ в виде смеси составила 290 м.

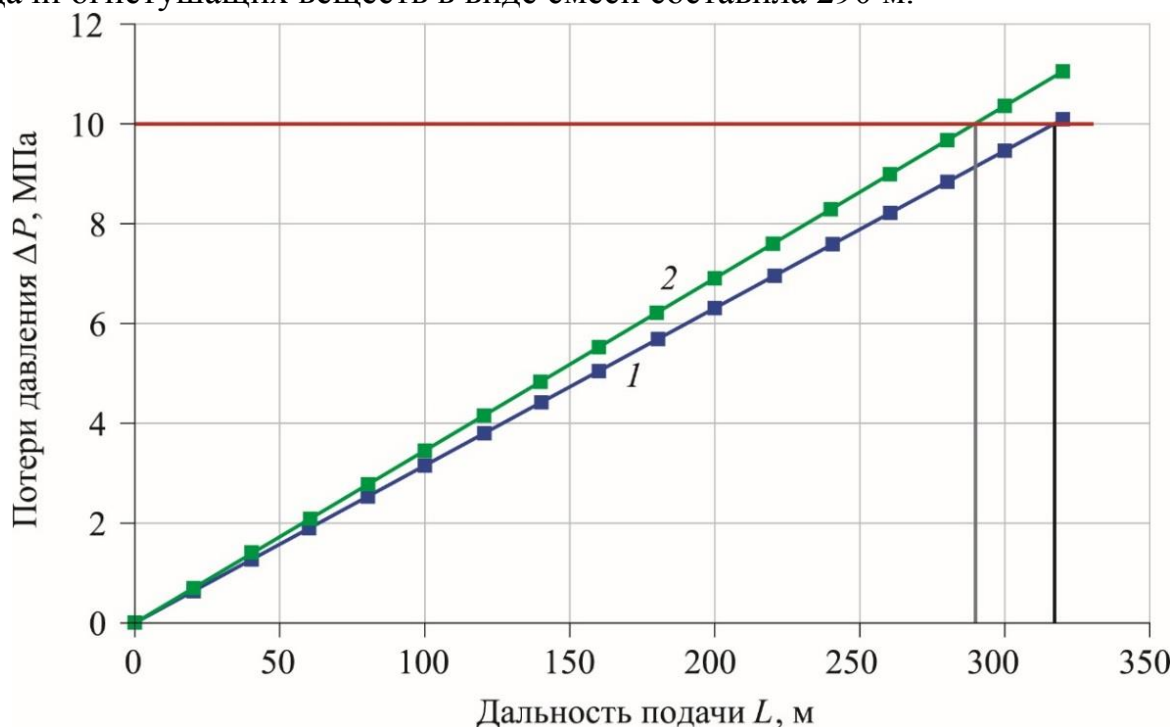


Рисунок 4 – Сравнительный анализ данных по воде и смеси:

- 1 – линейные потери по воде; 2 – линейные потери по смеси;
- предельная дальность подачи воды, м; — предельная дальность подачи смеси, м;
- максимально допустимое падение давления, МПа

Была оценена сила реакции струи на стволе, значение которой составило для воды  $R_g = 249 \text{ Н}$  (25,4 кг), для смеси  $R_{см} = 254 \text{ Н}$  (25,9 кг), которую необходимо учитывать при совместной работе РТС и ствола установки пожаротушения.

**В четвёртой главе** диссертации «Применение мобильных робототехнических средств при тушении пожаров на объектах энергетики» сформированы основные технические требования к конструкции разрабатываемого робототехнического средства, разработан опытный образец робототехнического средства, предназначенного для объектов энергетики и рассмотрены тактические приемы его использования.

В результате анализа научно-методической и нормативной литературы, а также учитывая результаты проведенных исследований, были сформированы основные технические требования к конструкции разрабатываемого робототех-



нического средства пожаротушения, предназначенного для объектов энергетики.

Таблица 2 – Технические требования к конструкции РТС

№	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Цели применения:	1) проведение разведки пожара, сбор данных и мониторинг обстановки; 2) тушение пожаров, проведение аварийно-спасательных работ.
2.	Среда применения	Наземные
3.	Степень функциональности:	Многофункциональные (универсальные)
4.	Оснащение средствами тушения и проведения АСР	1) лафетный дистанционно-управляемый ствол с расходом огнетушащих веществ от 15 до 20 л/с; 2) ствол установки пожаротушения с гидроабразивной резкой; 3) роботизированная рука-манипулятор.
5.	Применяемые огнетушащие составы	1) вода, водный раствор пенообразователя; 2) тонкораспыленная вода (170 мкм); 3) смесь воды и абразива для резки.
6.	Тип привода	Электромеханический
7.	Тип движителя ходового модуля	Гусеничный
8.	Значение тяговых усилий	Не менее 100 кг
9.	Типы, классы и параметры типов наземных РТС	Легкий первый, масса св. 100 до 300 кг вкл. Подкласс от 101 до 150 кг вкл.
10.	Габаритные размеры	Не более мм: 1500x900x1900
11.	Время непрерывной работы РТС	Не менее 4 ч

В результате анализа технических требований, а также исходя из тактических особенностей применения мобильной робототехники, было принято решение о создании мобильного робототехнического комплекса (РТК), состоящего из двух РТС, имеющих одинаковую транспортную базу.

Первое робототехническое средство представляет собой дистанционно-управляемую платформу с электромеханическим приводом и гусеничным шасси, на которой размещается дистанционно-управляемый лафетный ствол с расходом огнетушащих веществ от 15 до 20 л/с, система технического зрения, освещения, тепловизор для поиска очагов горения и набор необходимого оборудования, обеспечивающего работоспособность РТС.

Второе робототехническое средство также представляет собой дистанционно-управляемую гусеничную платформу, на которой размещается роботизированная рука-манипулятор со схватом, имеющая пять степеней свободы, и ствол установки пожаротушения с гидроабразивной резкой. Наличие роботизированного манипулятора обеспечит выполнение тактических приемов со стволом установки пожаротушения, а также позволит производить разборку и транспортировку конструкций и оборудования при проведении аварийно-спасательных работ.

Разработанный проект робототехнического комплекса лег в основу создания мобильной роботизированной установки пожаротушения (МРУП).



Рисунок 5 – Мобильная роботизированная установка пожаротушения

Для оценки тактических возможностей предлагаемого робототехнического комплекса в качестве примера рассматривались объекты действующих атомных станций. При оценке тактических возможностей подачи огнетушащих веществ при помощи МРУП от пожарной автоцистерны, установленной на водисточник, удалось определить, что лишь в 75% случаев будет обеспечена подача огнетушащих веществ до объекта тушения.

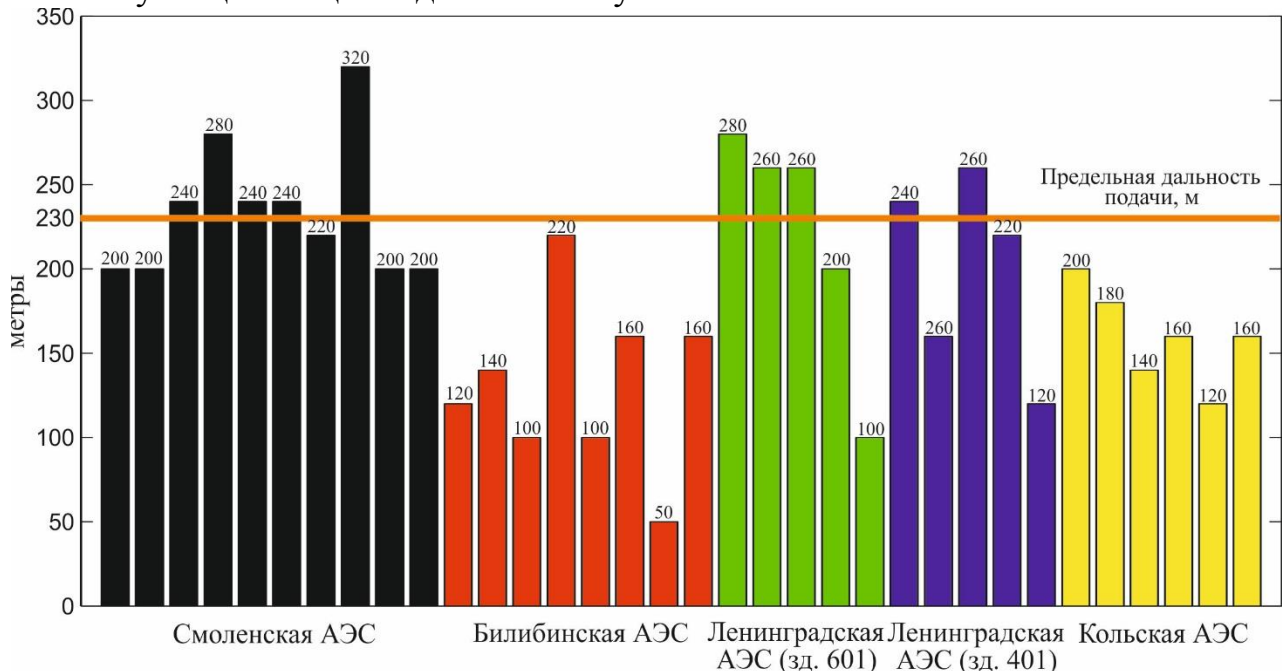


Рисунок 6 – Предельная дальность подачи огнетушащих веществ при помощи МРУП, оснащенной лафетным стволом

В связи с этим планирование применения МРУП должно осуществляться исходя из складывающейся обстановки на пожаре, с установкой пожарного ав-

томобиля на водоисточник или непосредственно у горящего здания, и обеспечения его огнетушащими веществами при подаче в перекачку или подвозом.

При оценке тактических возможностей подачи огнетушащих веществ при помощи РТС, оснащенного стволом установки пожаротушения с гидроабразивной резкой, было установлено, что подача огнетушащих веществ до рассматриваемых объектов тушения будет осуществлена в 99% случаев (рисунок 7).

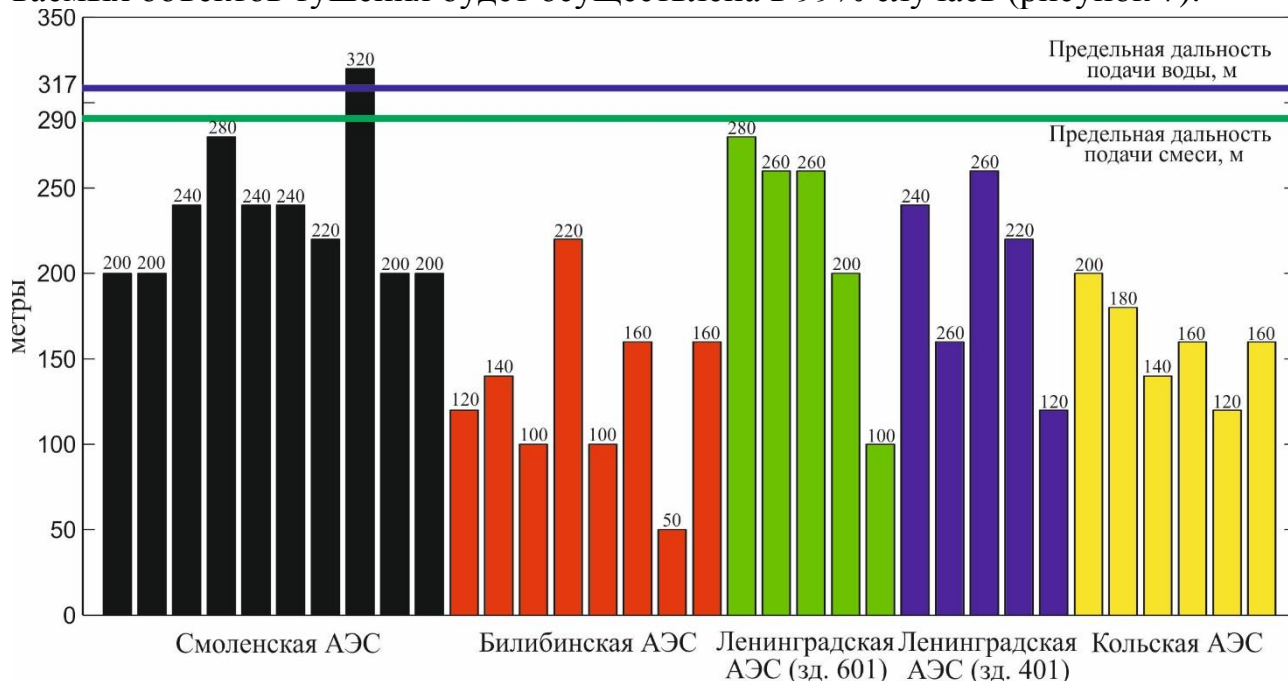


Рисунок 7 – Предельная дальность подачи огнетушащих веществ при помощи РТС, оснащенного стволом установки пожаротушения

Произведенная оценка тактических возможностей робототехнического комплекса, подтверждающая его эффективность, выполнена для рассматриваемых условий и не может гарантировать эффективное применение РТК во всех случаях. Для повышения эффективности и оперативности применения робототехнического комплекса должны разрабатываться тактические приемы для каждого конкретного объекта в отдельности, учитывая расположение водоисточников, планировку объекта, расположение наиболее пожароопасных помещений и оборудования.

**Заключение** содержит констатацию основных научных и практических результатов диссертационной работы. **В приложениях** представлены данные полученные в ходе экспериментальных исследований, акты внедрения результатов работы, сборочные чертежи измерительного комплекса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенного анализа пожаров и аварий, происходивших на объектах энергетики, была научно обоснована необходимость применения при тушении пожаров мобильной робототехники. Были сформированы требования к живучести и определен функционал для робототехнических средств пожаротушения, применяемых на объектах энергетики.

2. Проведенные исследования позволили обосновать огнетушащие составы и средства их подачи на объектах энергетики при применении мобильной робототехники пожаротушения.

3. По результатам проведенного эксперимента, по разработанной методике определены токи утечки по струе тонкораспыленной воды и смеси воды и абразива при подаче от установок пожаротушения с гидроабразивной резкой. Получены математические зависимости, позволяющие оценить безопасное расстояние при тушении электрооборудования под напряжением при применении установок пожаротушения с гидроабразивной резкой.

4. Для оценки тактических возможностей робототехнических средств при прокладке рукавных линий на объектах энергетики экспериментально были определены коэффициенты трения скольжения для пожарных напорных рукавов общего исполнения и различных диаметров условного прохода. В зависимости от исполнения поверхности они составили: наливной пол – 0,27, плитка – 0,36, асфальт – 0,58. Полученные данные были применены в модели для расчета возникающей силы трения, которую необходимо преодолевать при транспортировке рукавной линии.

5. Для проведения исследований был разработан измерительный комплекс, предназначенный для определения гидравлических характеристик систем пожаротушения с гидроабразивной резкой, который может работать в диапазоне измеряемых давлений от 0 до 40 МПа с водой и смесью жидкости и абразива.

6. Разработана методика и проведено экспериментальное исследование по оценке гидравлических параметров подачи огнетушащих веществ по рукавной линии от установок пожаротушения с гидроабразивной резкой. Определен коэффициент гидравлического трения, который составил  $\lambda^3 = 0,019$ . С помощью приближенной методики были получены значения предельных длин подачи воды ( $L_{\text{воды}} = 317$  метров) и смеси воды и абразива ( $L_{\text{смеси}} = 290$  метров) установками пожаротушения с гидроабразивной резкой.

7. С учетом полученных данных была разработана концепция робототехнического комплекса, предназначенного для тушения пожаров на объектах энергетики. Разработан и создан опытный образец мобильной роботизированной установки пожаротушения.

8. Разработано методическое пособие по технологии применения робототехнических комплексов для пожаротушения на объектах атомной энергетики, и методические рекомендации по тактике применения установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Гусев, И.А. Применение робототехнических комплексов для тушения пожаров на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков, А.В. Рож-

ков, О.В. Двоенко, И.А. Ольховский // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация – 2016. – №1. – С. 48-53.

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

3. Гусев И.А. Обоснование требований к мобильной робототехнике пожаротушения, применяемой на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация – 2017. – №3. – С. 21-27.

4. Гусев, И.А. Определение рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, применяемых на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – № 10 – С.69-76. DOI:10.18322/PVB.2017.26.10.69-76.

5. Гусев И.А. Определение тактических возможностей установок пожаротушения с гидроабразивной резкой при подаче огнетушащих веществ на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков, А.Л. Холостов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация – 2018. – №3. – С. 29-34.

#### **Публикации в материалах конференций:**

6. Гусев, И.А. Проведение гидравлических испытаний пожарных рукавов диаметром 150 мм [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков, О.В. Двоенко, И.А. Ольховский // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием в 2-х частях. Часть 1, Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2015. – С. 203–207.

7. Гусев, И.А. Применение мобильных робототехнических средств при тушении пожаров [Текст] / И.А. Гусев // Материалы X международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) в 2-х ч., Ч.1. Минск: КИИ, 2016. – С. 123–124.

8. Гусев, И.А. Применение мобильных комплексов с технологией гидроабразивной резки для тушения пожаров на объектах со сложной планировкой и с конструкциями из высокопрочных материалов [Текст] / И.А. Гусев // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2016. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 7–12.

9. Гусев, И.А. Системы гидроабразивной резки при тушении пожаров на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Сб. тезисов докладов 5-й международной науч.-практ. конф.: Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации, М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 291–293.

10. Гусев, И.А. Актуальность применения робототехнических средств при тушении пожаров на объектах энергетического комплекса [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Сборник тезисов докладов 5-й международной научно-практической конференции Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 294–296.

11. Гусев, И.А. Применение робототехнических комплексов для обеспе-

чения технологии пожаротушения на объектах атомной энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Сборник тезисов докладов 10-й международной научно-практической конференции: Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. – Зеленоград: ЭНИЦ, 2016. – С. 152–153.

12. Гусев, И.А. Обоснование требований к мобильной робототехнике пожаротушения, применяемой на объектах атомной энергетики [Текст] / И.А. Гусев // Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2017. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 27–33.

13. Гусев, И.А. Обоснование технических решений мобильной робототехники для тушения пожаров на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Материалы 26-й международной научно-практической конференции: Системы безопасности – 2017. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С.172–175.

14. Гусев, И.А. Обеспечение технологии пожаротушения в замкнутых объемах помещений объектов энергетики / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Материалы 26-й международной научно-практической конференции: Системы безопасности – 2017. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 176–179.

15. Гусев, И.А. Применение мобильной робототехники при тушении пожаров на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков // Сб. тезисов докладов 6-й международной научно-практической конференции: Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации, М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 313–315.

16. Гусев, И.А. Роботизированная дистанционно-управляемая установка пожаротушения для проведения работ на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, М.В. Алешков [и др.] // Материалы VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2018. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 10–18.

17. Гусев, И.А. Применение пожарных автомобилей с системами гидроабразивной резки при тушении пожаров [Текст] / И.А. Гусев, О.В. Двоенко, С.М. Зубачев, Д.В. Марченко // Материалы VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2018. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 18–26.

18. Гусев, И.А. Электрические эффекты при применении струй температурно-активированной воды для тушения пожаров класса Е на объектах энергетики [Текст] / И.А. Гусев, Т.И. Чистяков // Материалы VII международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2018. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 93–98.

Подписано в печать 10.10.2018. Формат 60x84/1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 559

---

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