

*На правах рукописи*



**Чистяков Тимур Игоревич**

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-АКТИВИРОВАННОЙ ВОДЫ  
ПРИ ТУШЕНИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ  
НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ**

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

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

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

Научный руководитель: **Роевко Владимир Васильевич**  
кандидат технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Решетников Александр Васильевич**  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Института  
теплофизики Уральского отделения  
Российской академии наук

**Логинов Владимир Иванович**  
доктор технических наук,  
ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак почета»  
научно-исследовательский институт  
противопожарной обороны» МЧС России,  
научно-исследовательский центр пожарно-  
спасательной и робототехники, главный  
научный сотрудник

Ведущая организация: **ФГБВОУ ВО «Академия гражданской  
защиты» МЧС России**

Защита состоится «15» декабря 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в 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:

<https://academygps.ru/upload/iblock/69a/69a2da0e471afb071062c78c39d121fc.pdf>

Автореферат разослан «14» октября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Электроэнергетика является важнейшей отраслью экономики Российской Федерации. К составным частям единой энергосистемы страны относятся: генерирующие мощности, системы преобразования, передачи и распределения электроэнергии. На этих объектах остаются риски возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций из-за ряда причин: высокий коэффициент износа оборудования, несвоевременное выполнение комплекса плановых ремонтных работ, человеческий фактор и другие причины. Многие аварийные ситуации на объектах электроэнергетики сопровождаются возникновением пожаров, наносящих прямой и сопутствующий ущерб в виде выхода из строя или длительной остановки незатронутого огнем оборудования.

Для минимизации последствий пожаров на энергетических предприятиях, прибывшие к месту вызова подразделения пожарной охраны должны как можно быстрее приступить к тушению, не допуская разрастание площади горения. Однако по причине высокой вероятности поражения личного состава электрическим током и электрической дугой быстрое начало процесса тушения электроустановок и электрооборудования не всегда возможно, так как время тратится на действия по обеспечению электробезопасности.

В ряде случаев обесточивание электроустановок и электрооборудования невозможно, так как данные действия могут привести к развитию чрезвычайной ситуации с более тяжелыми последствиями (например, радиационной аварии ядерного реактора АЭС). По этой причине актуальными проблемами являются: тушение электроустановок без снятия напряжения (пожары класса Е); обеспечение электробезопасности личного состава.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованию различных огнетушащих веществ и технических средств их подачи на применимость для тушения электроустановок под напряжением посвящены ряд работ, проведенных в ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России (ВНИИПО) (Е.В. Баранов, С.Н. Артюнов, Н.В. Навценя и др.) и Академии ГПС МЧС России (М.В. Алешков, А.А. Колбасин, В.Д. Федяев, И.А. Гусев). Все эти исследования основаны на применении эмпирической методики и регрессионного анализа. Несмотря на универсальность, простоту и эффективность эмпирической методики, она не раскрывает суть электрических процессов, протекающих на месте тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики, и в полной мере не объясняет связь физических параметров струй огнетушащих веществ с их электропроводимостью.

Среди всех огнетушащих веществ вода — наиболее распространенное, дешевое и эффективное средство пожаротушения. При применении в качестве огнетушащего вещества воды основной проблемой становится ее

электропроводимость. Авторы исследований в этой области отмечают большую перспективность применения распыленных и тонкораспыленных струй воды при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики по причине их низкой электропроводимости.

В Академии ГПС МЧС России под руководством профессора В.В. Роевко была разработана технология, а также технические средства подачи температурно-активированной воды. Струи температурно-активированной воды имеют ряд принципиальных отличий от струй тонкораспыленной воды, одним из которых является размер и концентрация капель. Гораздо меньшие по сравнению с тонкораспыленной водой капли температурно-активированной воды и их объемная концентрация в струе предполагают и более высокое электрическое сопротивление. Эти отличия температурно-активированной воды позволяют предположить, что ее применение для тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики более безопасно.

Однако струи температурно-активированной воды и технические средства их подачи не изучались в аспекте их применения для тушения электроустановок под напряжением. Вместе с тем необходимо провести более глубокое теоретическое исследование электрических процессов на месте тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики струями температурно-активированной воды и определить параметры, при которых такое тушение будет безопасным. Этой проблеме посвящена данная работа.

Таким образом, **целью исследования** является обоснование возможности применения температурно-активированной воды для тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

- проведение анализа известных методик изучения токопроводимости струй огнетушащих веществ и возможность их применения для струй температурно-активированной воды;

- разработка теоретического описания и модели электрических процессов, возникающих при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики струями температурно-активированной воды;

- разработка, на основе теоретической модели, опытно-экспериментального стенда и метода для определения электрического сопротивления струй температурно-активированной воды;

- проведение экспериментального исследования электрического сопротивления и углов раскрытия струй температурно-активированной воды;

- обоснование возможности применения температурно-активированной воды для безопасного тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

**Объектом исследования** являлся процесс тушения температурно-активированной водой электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

В качестве предмета исследования рассматривались параметры электрических процессов, протекающих в системе струй температурно-активированной воды при тушении электроустановок, функционирующих под напряжением на объектах энергетики.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Предложен экспериментально-аналитический метод определения комплексных электрических параметров струй температурно-активированной воды и гетерогенных струй других огнетушащих веществ, используемых при тушении электроустановок переменного тока, без отключения напряжения.

2. Разработан опытно-экспериментальный стенд для определения сопротивления постоянному току и углов раскрытия струй температурно-активированной воды и гетерогенных струй других огнетушащих веществ.

3. Проведен сравнительный анализ токопроводимости струи температурно-активированной воды и струй других огнетушащих веществ.

4. Обоснована возможность применения температурно-активированной воды для безопасного тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что полученные аналитические зависимости позволяют определить токи утечки по струе не только температурно-активированной воды, но и по гетерогенным струям других огнетушащих веществ. Обоснована возможность безопасного применения температурно-активированной воды и определены минимальные расстояния ее подачи при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

**Методология и методы исследования.** В основу исследования положен метод анализа электрических процессов, опирающийся на теории: электрических цепей, электротехники, перколяции, многофазных потоков, натурные испытания и расчеты, применяемые для определения возможности безопасного тушения температурно-активированной водой, поверхностным способом, пожаров электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

**Положения, выносимые на защиту:**

– результаты исследования комплексных электрических параметров струй температурно-активированной воды при их применении для тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики;

– аналитические выражения для определения величины переменного тока утечки в зависимости от комплексного сопротивления, геометрических параметров, концентрации фаз в струях температурно-активированной воды;

– экспериментально-аналитический метод определения безопасных расстояний тушения температурно-активированной водой электрооборудования в зависимости от величины переменного напряжения электроустановки, объемной концентрации фаз гетерогенных струй температурно-активированной воды и их геометрических и перколяционных параметров.

**Степень достоверности** основных результатов, выводов и рекомендаций исследования основана на научно выверенных и обоснованных методах анализа и обработки полученных данных. Экспериментальное исследование проводилось на стенде, в состав которого входит сертифицированное оборудование, выполняющее основное измерение (сопротивление постоянному току) с приемлемой точностью и не требующее дополнительной аттестации по метрологии.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы доложены на семи конференциях: 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2015» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2015); Всероссийской конференции и школы для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности» (г. Таганрог, Южный федеральный университет, 2015); 5-й Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); XXVI международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь» (г. Москва, Академия гражданской защиты МЧС России, 2016); IV Всероссийской научной конференции и школы для молодых ученых (с международным участием) «Системы обеспечения техносферной безопасности» (г. Таганрог, Южный федеральный университет, 2017); XXVI международная научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2018» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018).

**Практическая значимость** подтверждена использованием полученных в диссертации результатов применения температурно-активированной воды для безопасного тушения пожаров электроустановок под напряжением на объектах энергетики:

- при проведении безопасного тушения температурно-активированной водой электрощита под напряжением 380 В на территории ГКУ Архангельской области «Центр ГЗ»;

- при модернизации конструкции модельного ряда многоцелевых пожарно-спасательных автомобилей с установкой пожаротушения температурно-активированной водой на предприятии ООО «МПЗ» в целях их применения для тушения электроустановок под напряжением;

- повышении квалификации персонала филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция» по программе «Пожарно-технический минимум для оперативного персонала АЭС по тушению пожаров на электроустановках, находящихся под напряжением»;

- первоначальном обучении, профессиональной переподготовке и повышении квалификации слушателей ФАУ ДПО «Волгодонский учебный центр ФПС» по предметам «Пожарная и аварийно-спасательная техника» и «Пожарная тактика» по теме «Тушение электроустановок под напряжением».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России.

**Структура, объем работы и ее основные разделы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержание работы изложено на 277 страницах машинописного текста, включает в себя 16 таблиц, 62 рисунка, список литературы из 213 наименований, 5 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, проанализирован объект и предмет исследования, показаны научная новизна работы и ее практическая значимость.

**В первой главе** «Обоснование необходимости применения температурно-активированной воды для тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики»:

– проведен обзор статистических данных по авариям и пожарам на объектах энергетического комплекса;

– рассмотрены проблемы обеспечения электробезопасности при тушении пожаров электроустановок под напряжением;

– дан анализ методик исследования токопроводимости огнетушащих веществ;

– описаны особенности и способы получения температурно-активированной воды;

– приведены результаты пробного исследования температурно-активированной воды по эмпирической методике.

Анализ статистических данных Министерства энергетики Российской Федерации по авариям и пожарам на объектах энергетического комплекса за период 2013–2019 гг. представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические показатели аварийности генерирующего и электросетевого оборудования единой энергетической системы России за 2013–2019 гг.

<b>Всего по составляющим единой энергетической системы России</b>	<b>Число аварий по годам</b>						
	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019*</b>
<b>Электростанции</b>	4428	4545	4323	3943	3804	3277	961
<b>Электрические сети</b>	19 866	19 089	16 609	15 963	15 086	14 350	2978

\*Данные взяты по состоянию на январь–апрель 2019 г.

Анализ статистических данных ВНИИПО за десятилетний период с 2009 по 2018 гг. показывает, что в среднем за это время происходило 41 074 пожара в год по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования или 26,8 % от усредненного по годам числа всех пожаров по Российской Федерации. Прямой материальный ущерб составил в среднем 55 213 46 тыс. руб. в год, это 35,1 % от общего ущерба по всем причинам пожаров в стране. Показатель гибели людей находится на уровне 1941 человек в год или приблизительно 19 % от общего числа погибших на пожарах.

Тушение пожаров на объектах энергетики представляет повышенную опасность из-за риска поражения электрическим током. Так, по данным ФКУ Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России (НЦУКС) за период с 2008 по 2018 гг. при пожарах на объектах энергетики погибло 4, и получили травмы более 50 сотрудников противопожарной службы.

Электробезопасность личного состава пожарной охраны является ключевым фактором, влияющим на тактику тушения пожаров электроустановок под напряжением на объектах энергетики. Защита от поражения электрическим током (электрической дугой) обеспечивается снятием напряжения и остаточного электрического заряда с электроустановок. Однако бывают ситуации, когда личный состав пожарно-спасательных подразделений подвергается риску поражения электрическим током, например: 1) электрооборудование не может быть обесточено; 2) при случайном контакте с токоведущими частями, находящимися под напряжением; 3) вследствие нарушения правил безопасного тушения электроустановок.

Анализ научных работ в области электробезопасности показывает, что случаи электротравматизма являются следствием совпадения ряда факторов, повышающих вероятность поражения электрическим током, частота появления которых носит случайный характер. К таким факторам относятся:

1) наличие токопроводящей подстилающей поверхности (мокрый пол, земля), приводящей к возникновению зоны шагового напряжения на месте тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики;

2) возможное применение при тушении электроустановок воды с повышенной проводимостью (соленая или сильно загрязненная);

3) отсутствие у пожарного-ствольщика электрозащитного диэлектрического комплекта, что создает условия для протекания через его тело тока равного току утечки по струе огнетушащего вещества;

4) работа технических средств подачи огнетушащих веществ в режиме, при котором проводимость огнетушащих струй будет максимальной.

В данной работе учтены все перечисленные факторы, повышающие вероятность поражения личного состава электрическим током.

Исследования токопроводимости струй различных огнетушащих веществ объединяет общность методики, которую можно назвать эмпирической. Авторы исследований отмечают тот факт, что наиболее перспективно использование при тушении электроустановок под напряжением на объектах

энергетики тонкораспыленной воды. Экспериментально установлено, что чем меньше концентрация и размер капель воды в струе тонкораспыленной воды, тем ниже ее электропроводимость. Эмпирическая методика не дает объяснения физики этого процесса. На основании экспериментальных данных можно выдвинуть гипотезу о том, что струи температурно-активированной воды будут иметь еще меньшую или сопоставимую со струями тонкораспыленной воды электропроводимость.

На сегодняшний день температурно-активированную воду получают с помощью специальной установки, схематично изображенной на рисунке 1.

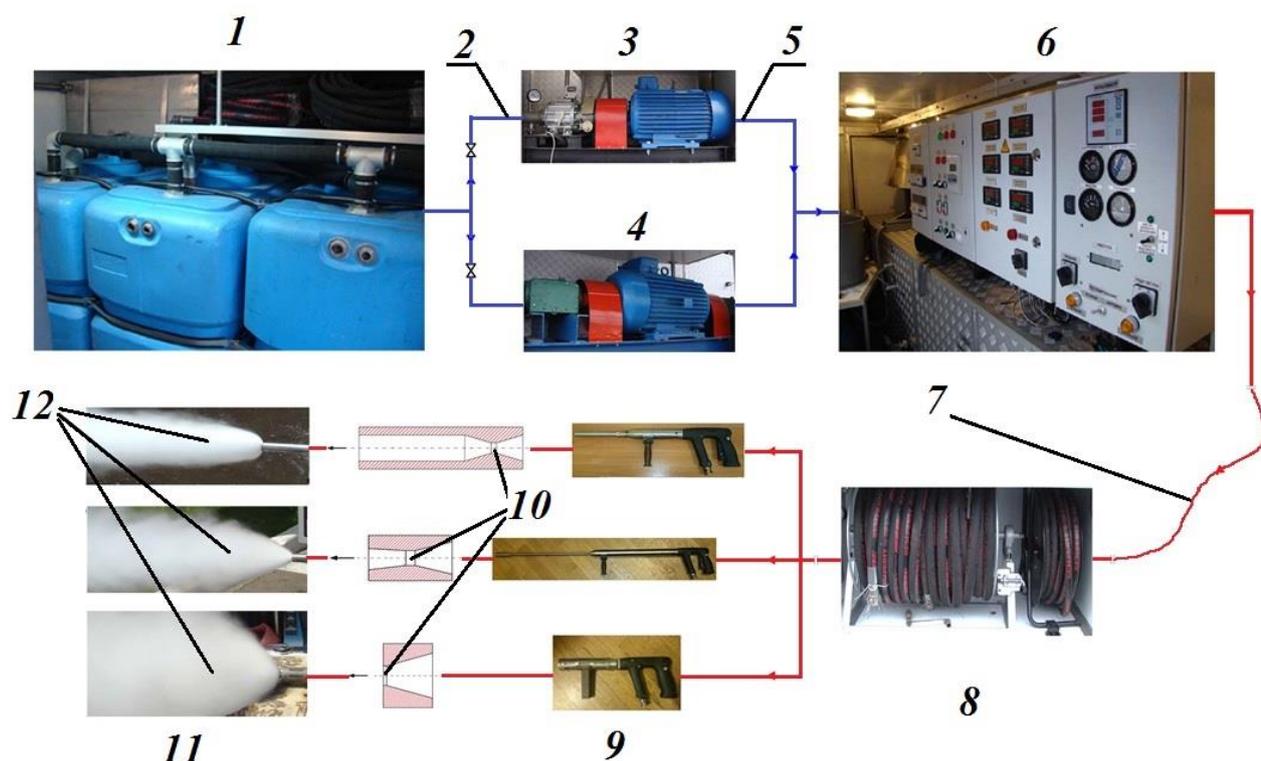


Рисунок 1 – Установка пожаротушения температурно-активированной водой (УПТАВ)

Вода с температурой от 5 до 30 °С из емкостей 1 по трубопроводу 2 поступает в один из насосов 3 или 4, создающий избыточное давление не менее 4 или 10 МПа соответственно. Далее по трубопроводу 5 вода поступает в теплообменник 6, в котором она нагревается до температуры 165–300 °С (в зависимости от режима) и становится недогретой водой. Затем без кипения недогретая вода по рукавным линиям 7, 8 подается к пожарным стволам 9. В полости насадки ствола 10 давление воды резко падает, и на очень непродолжительное время ( $10^{-4}$ – $10^{-9}$  с) вода переходит в метастабильное состояние с последующим взрывным вскипанием 11, после превращается в парок капельную смесь 12, состоящую из пара и мелкодисперсных капель воды диаметром от 0,01 до 10,0 мкм.

Предварительные исследования струй температурно-активированной воды, проведенные по эмпирической методике автором данной диссертации, показали, что:

– эмпирическая методика определения тока утечки по струе огнетушащих веществ, для температурно-активированной воды не подходит по причине того, что при получении ее струй генерируется электричество, вносящее недопустимые искажения в результаты измерения;

– струи температурно-активированной воды могут применяться на объектах энергетики, так как их электропроводимость позволяет безопасно тушить пожары электроустановок под напряжением;

– необходима разработка нового метода изучения электропроводимости струй температурно-активированной воды, который должен быть основан на более глубоком анализе электрических процессов, протекающих на месте тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики;

– необходима разработка нового экспериментального стенда, позволяющего определить ток утечки через струю температурно-активированной воды, без влияния электрического тока генерируемого самой струей.

**Во второй главе «Метод исследования токопроводимости струй температурно-активированной воды»:**

– представлен анализ с применением комплексных сопротивлений, электрических процессов на месте тушения электроустановок под напряжением;

– установлено влияние геометрических и электроперколяционных параметров струй температурно-активированной воды на их комплексное сопротивление;

– показана связь объемной концентрации фаз в гетерогенном потоке струй температурно-активированной воды с ее электрическим сопротивлением постоянному току;

– изложена концепция опытно-экспериментального стенда для определения сопротивления постоянному току и угла раскрытия струй температурно-активированной воды;

– предложен новый экспериментально-аналитический метод определения комплексных электрических параметров струй температурно-активированной воды.

Для решения задачи нахождения тока, протекающего через струю температурно-активированной воды, автором диссертации составлена эквивалентная электрическая схема, изображенная на рисунке 2.

Комплексная величина переменного синусоидального тока частой 50 Гц, протекающего через струю температурно-активированной воды, будет равна:

$$\dot{I} = \dot{E} / \dot{Z}, \quad (1)$$

где  $\dot{I}$  — переменный комплексный ток, протекающий по струе температурно-активированной воды, А;  $\dot{E}$  — переменное комплексное напряжение электроустановки, В;  $\dot{Z}$  — комплексное сопротивление струи температурно-активированной воды, Ом.

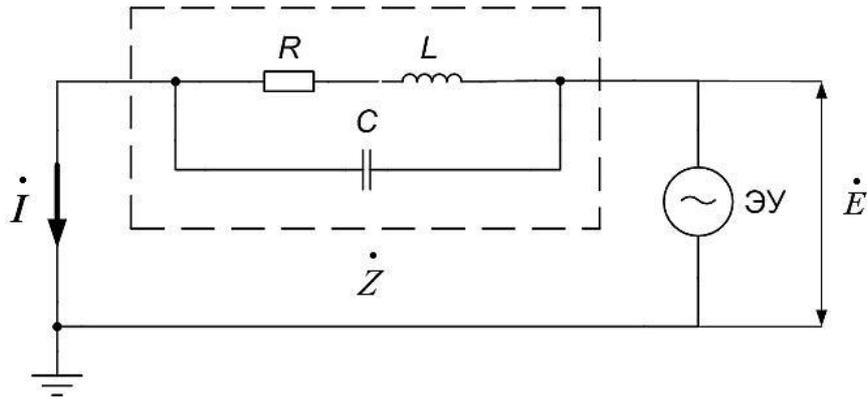


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения комплексного сопротивления  $\dot{Z}$ :  
 $\dot{I}$  — переменный комплексный ток, протекающий по струе температурно-активированной воды;  $R$  — суммарное резистивное сопротивление струи температурно-активированной воды;  $L$  — индуктивность струи температурно-активированной воды;  $C$  — емкость между стволом для подачи струи температурно-активированной воды и электроустановкой;  $\dot{E}$  — переменное комплексное напряжение электроустановки;  $\dot{Z}$  — комплексное сопротивление струи температурно-активированной воды

Анализ токов и напряжений схемы (см. рисунок 2) показал, что модуль комплексного сопротивления находится из выражения:

$$|\dot{Z}| = \frac{1}{2\pi FC} \cdot \sqrt{\frac{R^2 + (2\pi FL)^2}{R^2 + \left(2\pi FL - \frac{1}{2\pi FC}\right)^2}}, \quad (2)$$

где  $F$  — частота переменного тока, Гц;  $C$  — емкость между срезом сопла ствола для подачи струи температурно-активированной воды и электроустановкой, Ф;  $R$  — суммарное активное сопротивление струи температурно-активированной воды, Ом;  $L$  — индуктивность струи температурно-активированной воды, Гн.

Таким образом, нахождение действующего тока утечки (1) по струе температурно-активированной воды сводится к задаче определения сопротивления, емкости и индуктивности, как величин входящих в модуль комплексного сопротивления (2).

Проведенный автором диссертации анализ влияния геометрических параметров струй температурно-активированной воды на их активное сопротивление, емкость и индуктивность показал, что для нахождения этих параметров для струй в виде усеченного конуса, применимы выражения:

$$R = \frac{l_{\text{полн}} \rho_{\text{эф}} \text{ctg}(\alpha/2)}{\pi y_1 (l_{\text{полн}} + y_1 \text{ctg}(\alpha/2))}; \quad (3)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{эф}} \pi y_1 (l_{\text{полн}} + y_1 \text{ctg}(\alpha/2))}{l_{\text{полн}} \text{ctg}(\alpha/2)}; \quad (4)$$

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{\mu_{\text{эф}j}}{2} + \mu_e \left( \int_0^{l_{\text{полн}}} \text{Arsh} \frac{l_{\text{полн}} - l_2 \cos(\alpha/2)}{y_1 + l_2 \sin(\alpha/2)} dl_2 + \int_0^{l_{\text{полн}}} \text{Arsh} \frac{l_2 \cos(\alpha/2)}{y_1 + l_2 \sin(\alpha/2)} dl_2 \right) \right). \quad (5)$$

Здесь  $R$  — полное резистивное сопротивление струи температурно-активированной воды, Ом;  $l_{\text{полн}}$  — длина струи, м;  $\rho_{\text{эф}}$  — полное эффективное удельное сопротивление струи, Ом · м;  $\alpha$  — угол раскрытия струи, рад;  $y_1$  — радиус среза сопла ствола, м;  $C$  — емкость струи температурно-активированной воды, Ф;  $\varepsilon_{\text{эф}}$  — полная эффективная относительная диэлектрическая проницаемость струи температурно-активированной воды,  $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $L$  — индуктивность струи температурно-активированной воды, Гн;  $\mu_{\text{эф}j}$  — эффективная относительная магнитная проницаемость струи температурно-активированной воды;  $\mu_0 \approx 1,25663706 \cdot 10^{-6}$  — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $\mu_e$  — относительная магнитная проницаемость внешней среды.

Детальный анализ выражений (3)–(5), проведенный в работе, показывает, что активное сопротивление  $R$ , электрическая емкость  $C$  и индуктивность  $L$  нелинейно зависят от геометрических параметров струй (длины  $l_{\text{полн}}$ , угла раскрытия  $\alpha$ , радиуса среза сопла ствола  $y_1$ ). Геометрические параметры находятся из анализа фото- и видеоматериалов фиксации эксперимента по подаче струй температурно-активированной воды из пожарных стволов автомобиля пожарного многоцелевого (АПМ).

Модуль комплексного сопротивления струй температурно-активированной воды (2) с учетом (3)–(5) зависит от их эффективных: удельного сопротивления  $\rho_{\text{эф}}$ , относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и относительной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{эф}j}$ . При их нахождении автором была использована *перколяционная модель протекания* постоянного тока, через усеченный конус струи температурно-активированной воды, состоящий из смеси сферических проводящих включений разного диаметра в непроводящей среде. Струи температурно-активированной воды являются неупорядоченной двухфазной системой, в которой дисперсная фаза содержит проводящие включения с проводимостью  $\sigma_v$  и нормированной к единице объемной концентрацией  $C_v$ , а дисперсионная фаза является непроводящей средой насыщенного газообразного пара с проводимостью  $\sigma_n$  и объемной концентрацией  $(1 - C_v)$ .

Проведенный теоретический анализ показывает, что выражения для определения  $\rho_{\text{эф}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и  $\mu_{\text{эф}j}$  будут иметь идентичную структуру. Это подтверждают уравнения Максвелла, описывающие квазистатические электрические и магнитные поля в установившемся двухфазном потоке струи температурно-активированной воды. С учетом зависимости концентрации проводящей фазы  $C_v$  от полной длины струи  $l_{\text{полн}}$ , эффективные электрические параметры также будут зависеть от длины струи температурно-активированной воды от среза сопла ствола до электроустановки и равны:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = f(\varepsilon_{\text{п}}; \varepsilon_{\text{в}}; C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) \\ \mu_{\text{эф},j}(l_{\text{полн}}) = f(\mu_{\text{п}}; \mu_{\text{в}}; C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})), \\ \rho_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = f(\rho_{\text{п}}; \rho_{\text{в}}; C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) \end{cases} \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{п}}$  и  $\varepsilon_{\text{в}}$  — диэлектрическая проницаемость пара и воды в струе температурно-активированной воды соответственно;  $\mu_{\text{п}}$  и  $\mu_{\text{в}}$  — магнитная проницаемость пара и воды в струе температурно-активированной воды соответственно;  $\rho_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  — удельное сопротивление пара и воды в струе температурно-активированной воды соответственно.

Установленная автором идентичность структуры аналитических выражений в формулах (6) позволяет привести только аналитическое выражение для эффективной электрической проводимости, которое будет иметь вид формулы Максвелла — Гарнетта, полученной с помощью метода эффективной среды:

$$\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \sigma_{\text{п}} \frac{\sigma_{\text{в}}(1 + 2C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) + 2\sigma_{\text{п}}(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))}{(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{в}} + (2 + C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\sigma_{\text{п}}}. \quad (7)$$

Проведя преобразование выражения (7), автор получил формулу для объемной концентрации капель в струе температурно-активированной воды:

$$C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}) = \frac{(\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) - \sigma_{\text{п}})(2\sigma_{\text{п}} + \sigma_{\text{в}})}{(\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) + 2\sigma_{\text{п}})(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{п}})}. \quad (8)$$

В выражении (8) присутствует эффективная удельная электрическая проводимость  $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ , зависящая от длины струи температурно-активированной воды, которая является величиной обратной эффективного удельного сопротивления  $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = 1/(\rho_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}))$ . С учетом этого автором исследования была найдена  $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  из формулы (3), имеющая вид:

$$\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \frac{l_{\text{полн}} \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{R(l_{\text{полн}}) \pi y_1 (l_{\text{полн}} + y_1 \operatorname{ctg}(\alpha/2))}, \quad (9)$$

где  $R(l_{\text{полн}})$  — сопротивление струи температурно-активированной воды постоянному току, зависящее от длины струи, Ом;  $l_{\text{полн}}$  — длина струи температурно-активированной воды, м;  $\alpha$  — угол раскрытия струи, рад;  $y_1$  — радиус среза сопла ствола, м.

Совместное рассмотрение формул (8) и (9), выполненное автором, показывает прямую зависимость объемной концентрации от сопротивления струи температурно-активированной воды постоянному току  $R(l_{\text{полн}})$ .

Проведенное в работе теоретическое исследование позволяет предложить научно обоснованную конструкцию опытно-экспериментального стенда для определения сопротивления постоянному току  $R(l_{\text{полн}})$  и угла раскрытия  $\alpha$  струй температурно-активированной воды при подаче их из пожарных стволов АПМ.

Опытно-экспериментальный стенд, схема которого изображена на рисунке 3, общий вид — на рисунке 4, состоит из следующих элементов:

- заземленной стойки держателя испытуемого ствола;
- подвижного сетчатого зонда на опорных изоляторах;
- заземленного металлического экрана;
- фоторегистраторов;
- измерительного комплекса;
- цифрового мегаомметра с ноутбуком.

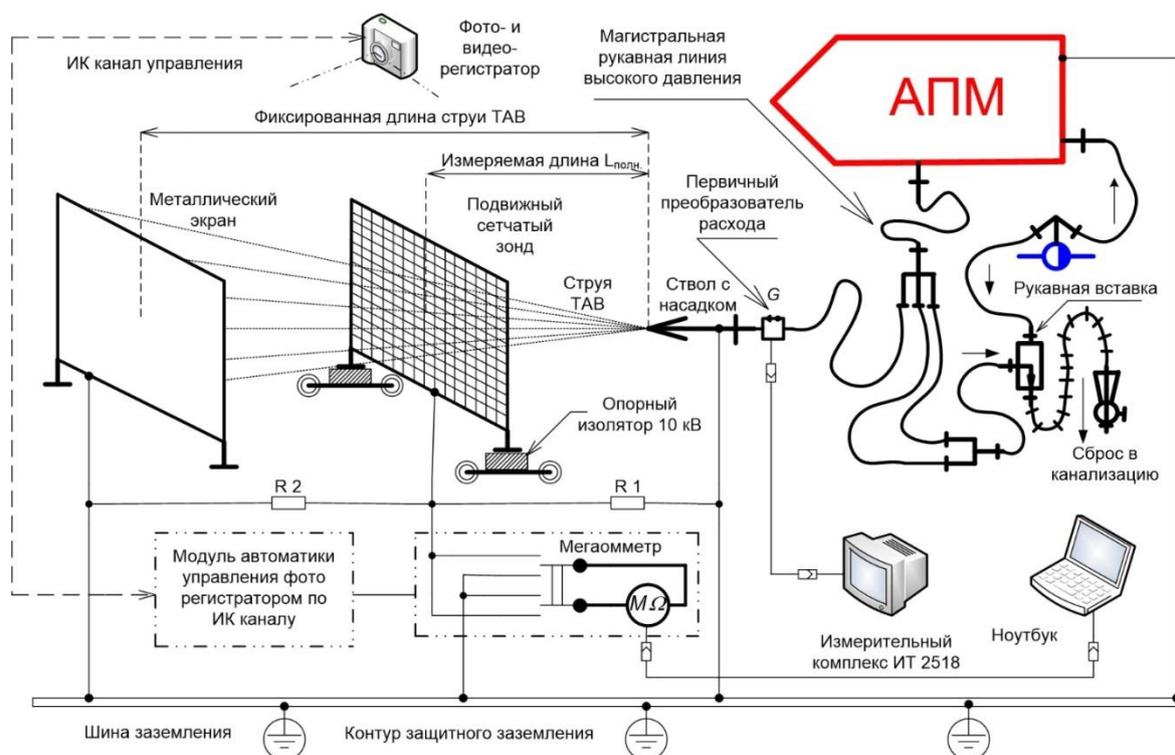


Рисунок 3 – Схема опытно-экспериментального стенда для измерения сопротивления постоянному току и угла раскрытия струи температурно-активированной воды



*а*

*б*

Рисунок 4 – Опытно-экспериментальный стенд:  
*а* — общий вид; *б* — проведение экспериментального исследования

При проведении испытаний основным электроизмерительным прибором являлся цифровой мегаомметр постоянного тока М4122U, подключаемый для съема показаний и управляемый с помощью ноутбука. Оператор УПТАВ организует подачу недогретой воды от АПМ в режиме ТАВ 100 и следит за ее

параметрами (температура, давление, расход). Корпусы АПМ, датчика расхода, пожарного ствола, металлического экрана соединены в одну электрическую цепь посредством общей шины заземления. На схеме (см. рисунок 3)  $R_1$  — сопротивление части струи температурно-активированной воды между испытываемым стволом и подвижным сетчатым зондом,  $R_2$  — сопротивление части струи между подвижным сетчатым зондом и неподвижным металлическим экраном. Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  на схеме соединены параллельно, их общее сопротивление  $R_{изм}$  измеряется мегаомметром. Для нейтрализации влияния постоянной составляющей, образующейся при переносе отрицательного заряда, каплями струи температурно-активированной воды необходимо провести  $n$  измерений сопротивления струи  $R_{изм.i}$  при верхнем и  $k$  измерений сопротивления струи  $R_{изм.j}$  при нижнем положениях переключателя полярности щупов мегаомметра при каждом увеличении расстояния на величину  $\Delta l_{полн}$ , а полученные данные усреднить по количеству измерений:

$$R_{изм} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{изм.i} + \sum_{j=1}^k R_{изм.j}}{n + k}. \quad (10)$$

Проведя несложные преобразования и найдя в массиве  $R_{изм}$  максимальное значение сопротивления  $R_{max}$ , автор диссертации получил выражение, определяющее массив значений  $R(l_{полн})$ :

$$\begin{cases} R(l_{полн}) = 2 \left( R_{max} - \sqrt{R_{max} (R_{max} - R_{изм})} \right) & \text{при } R(l_{полн}) \leq 2R_{max}, \\ R(l_{полн}) = 2 \left( R_{max} + \sqrt{R_{max} (R_{max} - R_{изм})} \right) & \text{при } R(l_{полн}) > 2R_{max}. \end{cases} \quad (11)$$

Для получения массива данных об усредненных геометрических параметрах струи температурно-активированной воды, зависящих от  $l_{полн.}$ , автор использовал формулу аналогичную (11) для угла раскрытия струи  $\alpha(l_{полн})$ :

$$\alpha(l_{полн}) = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{изм.i} + \sum_{j=1}^k \alpha_{изм.j}}{n + k}. \quad (12)$$

Для получения непрерывных функций, массивы значений  $R(l_{полн})$  и  $\alpha(l_{полн})$  необходимо аппроксимировать аналитическими выражениями с доверительной вероятностью 0,95.

Для нахождения величины переменного синусоидального тока частотой 50 Гц, протекающего через струю температурно-активированной воды при ее подаче из пожарного ствола АПМ на электроустановку под напряжением, и безопасных расстояний тушения на объектах энергетики в диссертации предлагается ранее не применявшийся экспериментально-аналитический метод, который состоит из следующих шагов.

1. При проведении исследований на опытно-экспериментальном стенде получаем массив значений сопротивлений  $R_{изм.i}$  и  $R_{изм.j}$ , который усредняется по формуле (10) в целях получения значения  $R_{изм}$  в каждой точке измерения.

Определяем доверительный интервал с погрешностью 5 % для усредненной величины сопротивления  $R_{\text{изм}}$  и строим зависимость:

$$R_{\text{изм}}(l_{\text{полн}}) = f(l_{\text{полн}}). \quad (13)$$

Из анализа кривой (13) находим величину  $R_{\text{max}}$  ее максимума. Применяя выражение (11), находим массив значений  $R(l_{\text{полн}})$  и доверительный интервал. Строим эти зависимости и аппроксимируем их аналитическим выражением с эмпирическими коэффициентами вида:

$$R(l_{\text{полн}}) = g(l_{\text{полн}}). \quad (14)$$

При измерениях проводится фотофиксация изображения струи. Используя специальное программное обеспечение, по фотографиям струй температурно-активированной воды определяем значения углов раскрытия  $\alpha_{\text{изм},i}$  и  $\alpha_{\text{изм},j}$ . Используя выражение (12), находим массив значений  $\alpha(l_{\text{полн}})$ , для которых определяем доверительный интервал с погрешностью 5 % и определяем значение угла раскрытия  $\alpha$  струи температурно-активированной воды.

2. Полученное аналитическое выражение (14) для  $R(l_{\text{полн}})$  пожарного ствола и значения его геометрических параметров  $l_{\text{полн}}$ ,  $\alpha$  и  $u_1$  применяются при нахождении эффективной удельной электрической проводимости  $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  по выражению (9). Используя табличные значения из справочной литературы и (или) данные кондуктометрии для удельной электрической проводимости воды  $\sigma_{\text{в}}$  и пара  $\sigma_{\text{п}}$ , а также значения  $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$ , из выражения (8) находим объемную концентрацию  $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$  для струи температурно-активированной воды.

3. Используя массив значений объемной концентрации  $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$ , полученный из выражения (8), и табличные значения из справочной литературы для диэлектрической проницаемости пара  $\epsilon_{\text{п}}$  и воды  $\epsilon_{\text{в}}$ , заменяя ими  $\sigma_{\text{п}}$  и  $\sigma_{\text{в}}$  в выражении (7), находим массив значений эффективной относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  по формуле

$$\epsilon_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \epsilon_{\text{п}} \frac{\epsilon_{\text{в}} (1 + 2C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) + 2\epsilon_{\text{п}} (1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))}{(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\epsilon_{\text{в}} + (2 + C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\epsilon_{\text{п}}}. \quad (15)$$

4. Используя массив значений  $C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})$  и табличные значения из справочной литературы для  $\mu_{\text{п}}$  и  $\mu_{\text{в}}$  (магнитная проницаемость пара и воды в струе температурно-активированной воды соответственно), находим массив значений эффективной относительной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{эф},j}(l_{\text{полн}})$ , с учетом того, что ее формула имеет структуру идентичную (7) и (15):

$$\mu_{\text{эф}}(l_{\text{полн}}) = \mu_{\text{п}} \frac{\mu_{\text{в}} (1 + 2C_{\text{в}}(l_{\text{полн}})) + 2\mu_{\text{п}} (1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))}{(1 - C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\mu_{\text{в}} + (2 + C_{\text{в}}(l_{\text{полн}}))\mu_{\text{п}}}. \quad (16)$$

5. По формуле (4), используя массив значений  $\epsilon_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  и геометрические параметры  $l_{\text{полн}}$ ,  $\alpha$  и  $u_1$ , находим массив значений электрической емкости  $C(l_{\text{полн}})$  струи температурно-активированной воды.

6. По формуле (5), используя массив  $\mu_{\text{эф},j}(l_{\text{полн}})$ , табличное значение из справочной литературы для  $\mu_{\text{е}}$  (относительная магнитная проницаемость

внешней среды) и  $l_{\text{полн}}$ ,  $\alpha$  и  $u_1$ , находим массив значений индуктивности  $L(l_{\text{полн}})$  струи температурно-активированной воды.

7. Используя полученные данные для сопротивления постоянному току  $R(l_{\text{полн}})$ , электрической емкости  $C(l_{\text{полн}})$ , индуктивности  $L(l_{\text{полн}})$  струи температурно-активированной воды и задаваясь значением частоты  $F = 50$  Гц переменного тока, по формуле (2) находим массив значений  $|\dot{Z}(l_{\text{полн}})|$  модуля комплексного сопротивления струи.

8. По формуле (1) находим значения модуля комплексной силы тока  $|\dot{I}(l_{\text{полн}})|$ , протекающей по струе температурно-активированной воды, в зависимости от ряда значений модуля комплексной э.д.с.  $|\dot{E}|$  электроустановки.

9. Находим массив амплитудного значения силы тока  $I(l_{\text{полн}}) = \sqrt{2}|\dot{I}(l_{\text{полн}})|$  и строим зависимости силы тока от расстояния до электроустановки при различных значениях напряжения  $E$ .

10. Ограничиваем силу тока на уровне 0,5 мА и определяем безопасные расстояния тушения электроустановок различного напряжения, пожарными стволами АПМ.

**В третьей главе «Критерии применимости температурно-активированной воды для тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики»:**

- представлены результаты экспериментального исследования сопротивления постоянному току и угла раскрытия струй температурно-активированной воды при подаче их из пожарных стволов АПМ;
- проведена аппроксимация результатов аналитическими выражениями;
- получены комплексные электрические параметры струй температурно-активированной воды;
- определены минимальные расстояния безопасного применения пожарных стволов АПМ;
- проведен сравнительный анализ безопасности применения температурно-активированной воды и других огнетушащих веществ при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

Результаты экспериментального исследования сопротивления постоянному току и углов раскрытия струй температурно-активированной воды для пожарных стволов АПМ были предварительно обработаны автором согласно п. 1 метода и в соответствии с выражениями (10)–(14). Затем для полученных массивов сопротивлений постоянному току  $R(l_{\text{полн}})$  и углов раскрытия  $\alpha(l_{\text{полн}})$  струй температурно-активированной воды были найдены доверительные интервалы с вероятностью  $p = 0,95$ . Полученный результат для  $R(l_{\text{полн}})$  был аппроксимирован экспоненциально-степенной моделью (ЭСМ), которая описывается выражением:

$$R(l_{\text{полн}}) = R_0 \exp(\chi l_{\text{полн}}^\lambda), \quad (17)$$

где  $R_0$  — начальное сопротивление, Ом;  $\chi$  и  $\lambda$  — константы ЭСМ.

Аналитические выражения (14), (17) были использованы для нахождения эффективной удельной электрической проводимости  $\sigma_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  струй температурно-активированной воды, подаваемых из пожарных стволов АПМ. Для этого в соответствии с п. 2 метода автор использовал выражение (9) и исходные данные из таблицы 2 при расстоянии экстраполяции  $l = 5$  м.

Таблица 2 – Исходные данные для нахождения удельной эффективной проводимости струй температурно-активированной воды

Исходные значения параметров	Тип пожарного ствола			
	Трансформер компактной струи	Трансформер распыленной струи	Пика	Дальнобойный
Сопротивление $R(l_{\text{полн}})$ , ГОм	$0,8\exp(1,7l_{\text{полн}}^{0,7})$	$0,7\exp(1,75l_{\text{полн}}^{0,7})$	$0,85\exp(1,85l_{\text{полн}}^{1,1})$	$2,2\exp(0,65l_{\text{полн}}^{0,9})$
Радиус среза сопла ствола $u_1$ , м	0,0095	0,0225	0,0075	0,009
Угол раскрытия струи $\alpha$ , град	15,45	51,81	11,89	11,04

В соответствии с выражением (8) была найдена объемная концентрация  $C_v(l_{\text{полн}})$  струи температурно-активированной воды, используя справочное значение для удельной электрической проводимости пара  $\sigma_{\text{п}} = 0,5$  нСм/м и данные кондуктометрии для удельной электрической проводимости воды  $\sigma_{\text{в}} = 0,0312$  См/м.

В соответствии с п. 3 и 4 метода, используя массив значений объемной концентрации  $C_v(l_{\text{полн}})$  и справочные значения для диэлектрической проницаемости пара  $\epsilon_{\text{п}} = 1,00206$ , воды  $\epsilon_{\text{в}} = 66,6$  и магнитной проницаемости пара  $\mu_{\text{п}} = 0,996$ , воды  $\mu_{\text{в}} = 0,999991$ , были найдены массивы  $\epsilon_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  из выражения (15) и  $\mu_{\text{эф},j}(l_{\text{полн}})$  из выражения (16) струй температурно-активированной воды.

В соответствии с п. 5 метода был найден массив значений электрической емкости  $C(l_{\text{полн}})$  по формуле (4), используя значения  $\epsilon_{\text{эф}}(l_{\text{полн}})$  и геометрические параметры струй из таблицы 2. Из визуального анализа значений электрической емкости  $C(l_{\text{полн}})$  струй температурно-активированной воды для всех типов пожарных стволов АПМ, следует, что ее среднее значение составляет не более 2 пФ, а максимальное не превышает 8 пФ.

Принимая во внимание факторы, повышающие вероятность поражения электрическим током, в расчетах была учтена дополнительная электрическая емкость  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$  между телом пожарного, работающего со стволом, и корпусом электроустановки:

$$C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}}) = \epsilon_0 \epsilon_{\text{возд}} \frac{(S_{\text{ч}} + S_{\text{эу}})}{l_{\text{полн}}}, \quad (18)$$

где  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$  — емкость между телом человека и корпусом электроустановки, Ф;  $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\epsilon_{\text{возд}} = 1,00057$  — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;

$S_{\text{ч}} = 2$  — площадь поверхности тела человека,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{ЭУ}} = 8$  — площадь поверхности электроустановки,  $\text{м}^2$ ;  $l_{\text{полн}}$  — расстояние между человеком и электроустановкой, м.

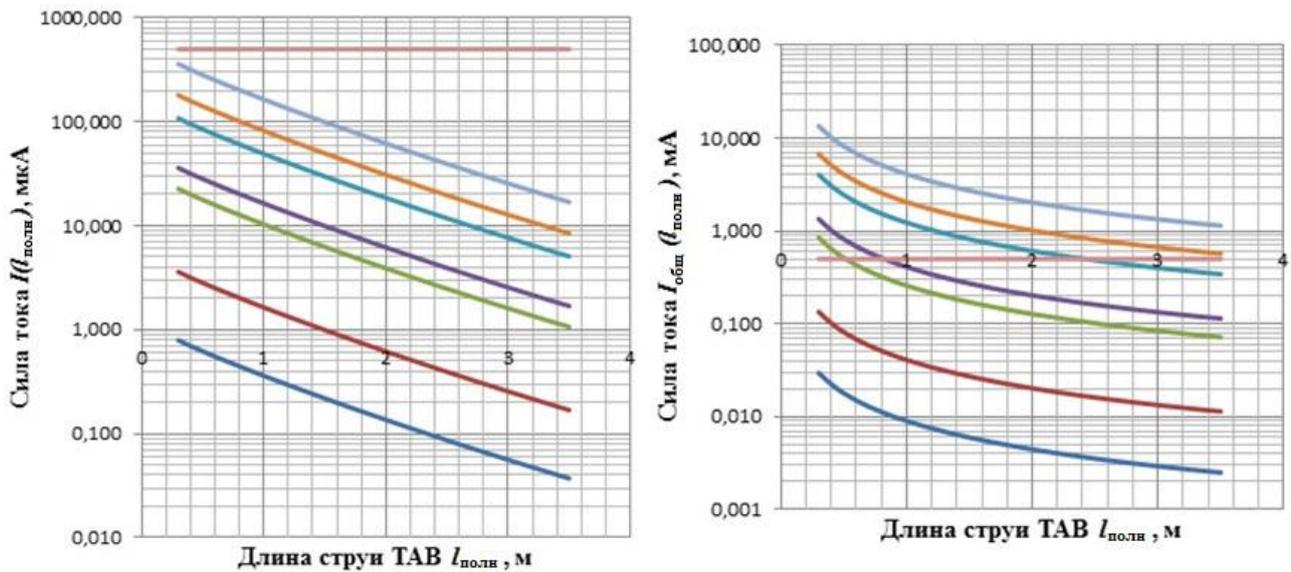
Эта емкость (18) оказывает влияние на ток, протекающий через тело человека на землю, так как  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$  включается параллельно  $C(l_{\text{полн}})$  и суммируется с ней. Полученное значение емкости  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$  почти в 40 раз превышает максимальное значение емкости  $C(l_{\text{полн}})$  струй температурно-активированной воды, что говорит о ее влиянии на токопроводимость струй.

В соответствии с п. 6 метода автором был найден массив значений индуктивности  $L(l_{\text{полн}})$  струй температурно-активированной воды из выражения (5), с учетом величин  $\mu_{\text{эф.ж}}(l_{\text{полн}})$ ,  $l_{\text{полн}}$ ,  $\alpha$ ,  $y_1$ , и относительной магнитной проницаемости внешней среды (воздуха)  $\mu_{\text{возд}} = 1,00000038$ . Максимальное полученное значение индуктивности  $L(l_{\text{полн}})$  не превышает величину 1,7 мкГн, т. е. ее вклад в токопроводимость струй температурно-активированной воды невелик.

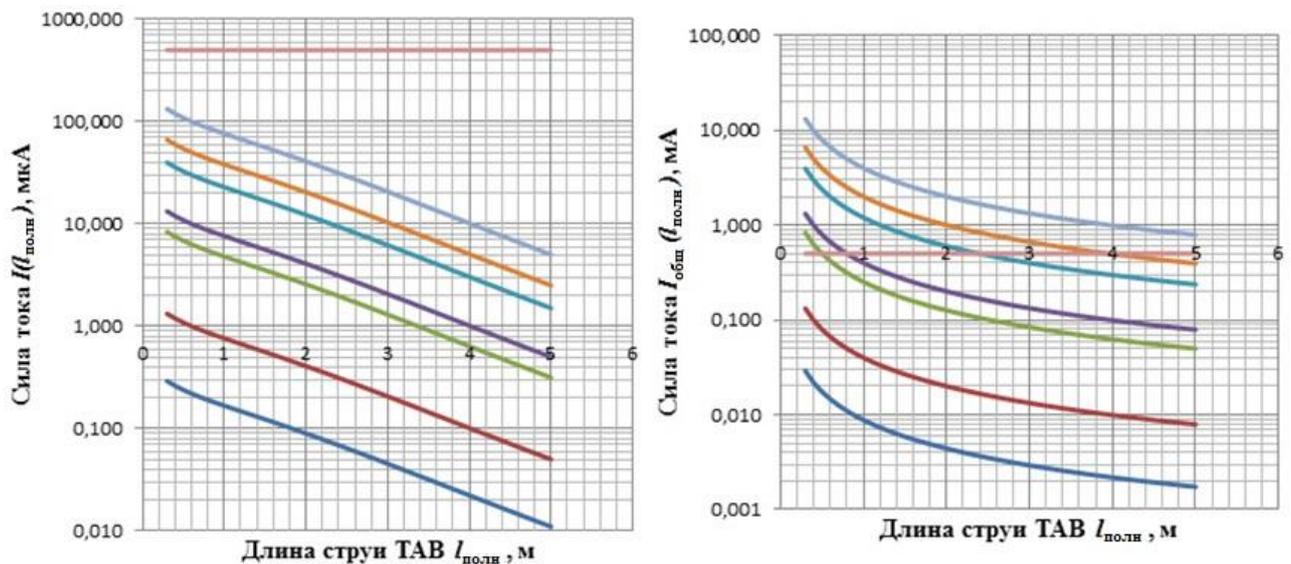
Затем в соответствии с п. 7 метода по формуле (2) были найдены модули комплексных сопротивлений  $|\dot{Z}(l_{\text{полн}})|$  и  $|\dot{Z}_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})|$  струи температурно-активированной воды без учета и с учетом емкости  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$  соответственно. При нахождении массивов значений  $|\dot{Z}(l_{\text{полн}})|$  и  $|\dot{Z}_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})|$  использовались найденные  $R(l_{\text{полн}})$ ,  $C(l_{\text{полн}})$ ,  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$ ,  $L(l_{\text{полн}})$  струи температурно-активированной воды и значение частоты  $F = 50$  Гц.

Проведенный автором работы анализ результатов вычислений, свидетельствует о том, что индуктивность  $L(l_{\text{полн}})$  и емкость  $C(l_{\text{полн}})$  увеличивают проводимость струй температурно-активированной воды при протекании по ним переменного тока частотой 50 Гц по сравнению с постоянным током. Этот факт говорит в пользу необходимости учета емкостной и индуктивной составляющих комплексного сопротивления гетерогенных струй не только температурно-активированной воды, но и других огнетушащих веществ. Учет емкости  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$  между телом человека и корпусом электроустановки приводит к скачку проводимости струй температурно-активированной воды, модуль комплексного сопротивления  $|\dot{Z}_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})|$  на несколько порядков меньше чем  $|\dot{Z}(l_{\text{полн}})|$ .

Далее в соответствии с п. 8–10 метода по формуле (1) были найдены массивы значений модуля комплексной силы тока  $|\dot{I}(l_{\text{полн}})|$ , протекающей по струе температурно-активированной воды, в зависимости от  $|\dot{Z}(l_{\text{полн}})|$  и ряда значений модуля комплексного напряжения  $|\dot{E}|$  электроустановки (ЭУ), без учета электрической емкости между телом человека и корпусом электроустановки, а также массив амплитудного значения силы тока  $I(l_{\text{полн}}) = \sqrt{2}|\dot{I}(l_{\text{полн}})|$ . Аналогичным образом были найдены амплитудные значения сила тока  $I_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})$  с учетом  $C_{\text{ч}}(l_{\text{полн}})$ , используя значения модуля комплексного сопротивления  $|\dot{Z}_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})|$ . Зависимости силы тока от расстояния до ЭУ при различных значениях амплитуды напряжения  $E$  показаны на рисунках 5 и 6.



а



б

Рисунок 5 – Зависимости сил токов  $I(I_{\text{полн}})$  и  $I_{\text{общ}}(I_{\text{полн}})$  от длины струи температурно-активированной воды и напряжения электроустановки для пожарного ствола: а — ствол-трансформер распыленной струи; б — ствол-трансформер компактной струи; ТАВ — температурно-активированная вода;

- Напряжение ЭУ 220 В
- Напряжение ЭУ 10 кВ
- Напряжение ЭУ 100 кВ
- Напряжение ЭУ 1 кВ
- Напряжение ЭУ 30 кВ
- Сила неощутимого тока, мА
- Напряжение ЭУ 6,3 кВ
- Напряжение ЭУ 50 кВ

Анализ результатов показывает, что струи температурно-активированной воды для всех пожарных стволов АПМ обладают диэлектрическими (изоляционными) свойствами. Применение их для тушения пожаров электроустановок под напряжением на объектах энергетики безопасно. Однако необходимо отметить, что емкость между корпусом электроустановки и телом пожарного, работающего со стволом, увеличивает проводимость струй температурно-активированной воды. Поэтому для расчета безопасного

расстояния тушения  $l_{\text{тушения}}$  необходимо учитывать только массивы амплитудных значений сил токов  $I_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})$ .

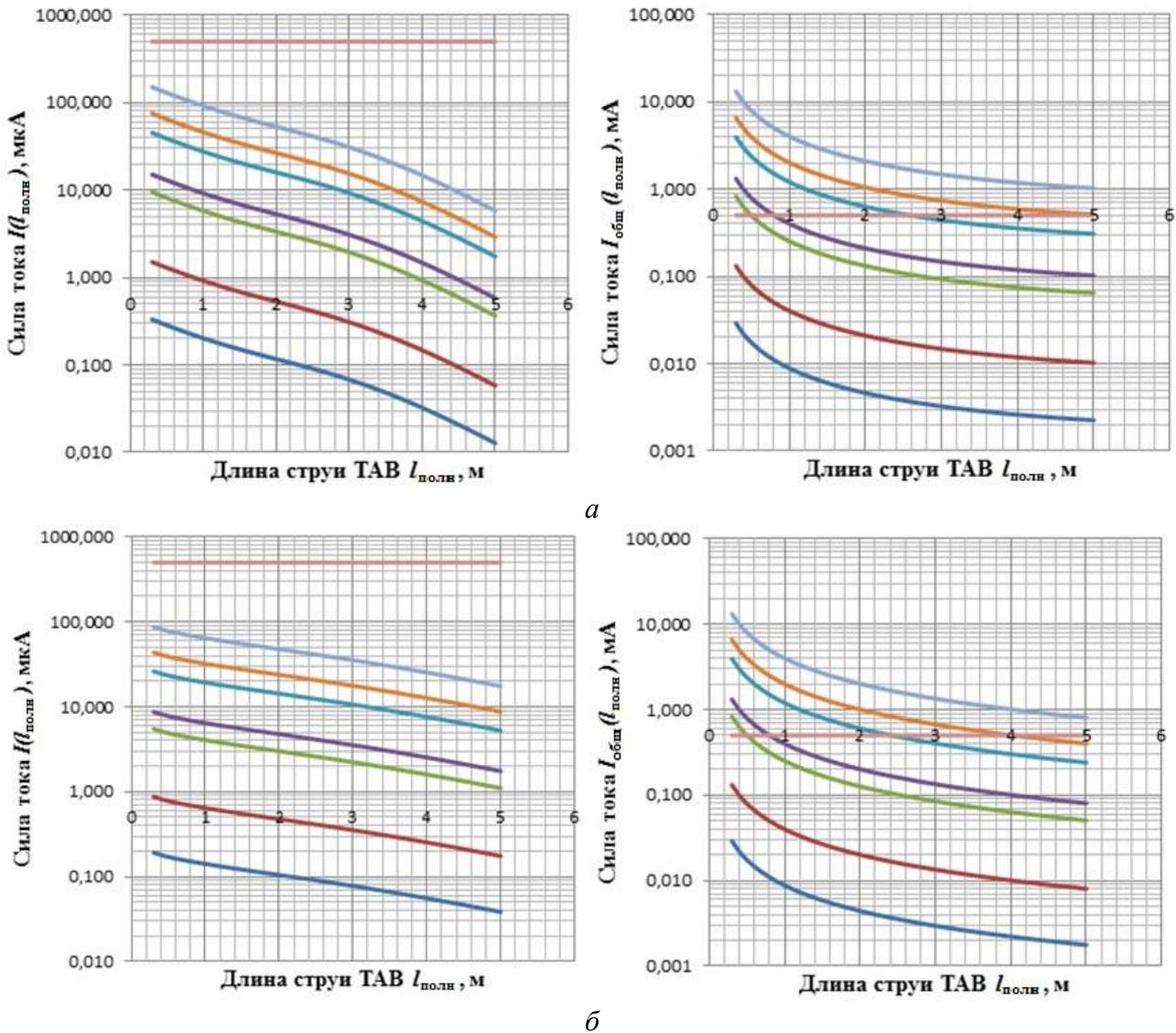


Рисунок 6 – Зависимости сил токов  $I(l_{\text{полн}})$  и  $I_{\text{общ}}(l_{\text{полн}})$  от длины струи температурно-активированной воды и напряжения электроустановки для пожарного ствола: *а* — ствол-пика; *б* — ствол дальнобойный; ТАВ — температурно-активированная вода;

- Напряжение ЭУ 220 В
- Напряжение ЭУ 10 кВ
- Напряжение ЭУ 100 кВ
- Напряжение ЭУ 1 кВ
- Напряжение ЭУ 30 кВ
- Напряжение ЭУ 50 кВ
- Напряжение ЭУ 6,3 кВ
- Сила неощутимого тока, мА

Далее, задаваясь пороговым значением осязаемого тока величиной 0,5 мА, автором были найдены зависимости безопасного расстояния тушения  $l_{\text{тушения}}$  от действующего напряжения  $U_{\text{ЭУ}}$  электроустановки для исследуемых пожарных стволов АПМ, результат представлен на рисунке 7.

**Заключение** содержит констатацию основных научных и практических результатов работы.

**В приложениях** представлены:

- программа и методика экспериментального исследования сопротивления постоянному току и угла раскрытия струй температурно-активированной воды при подаче их из пожарных стволов АПМ;
- фотографии опытно-экспериментального стенда, дополнительного оборудования и проведения экспериментального исследования;
- акты и протоколы экспериментального исследования;
- данные кондуктометрии пробы воды;
- акты внедрения результатов диссертационной работы.

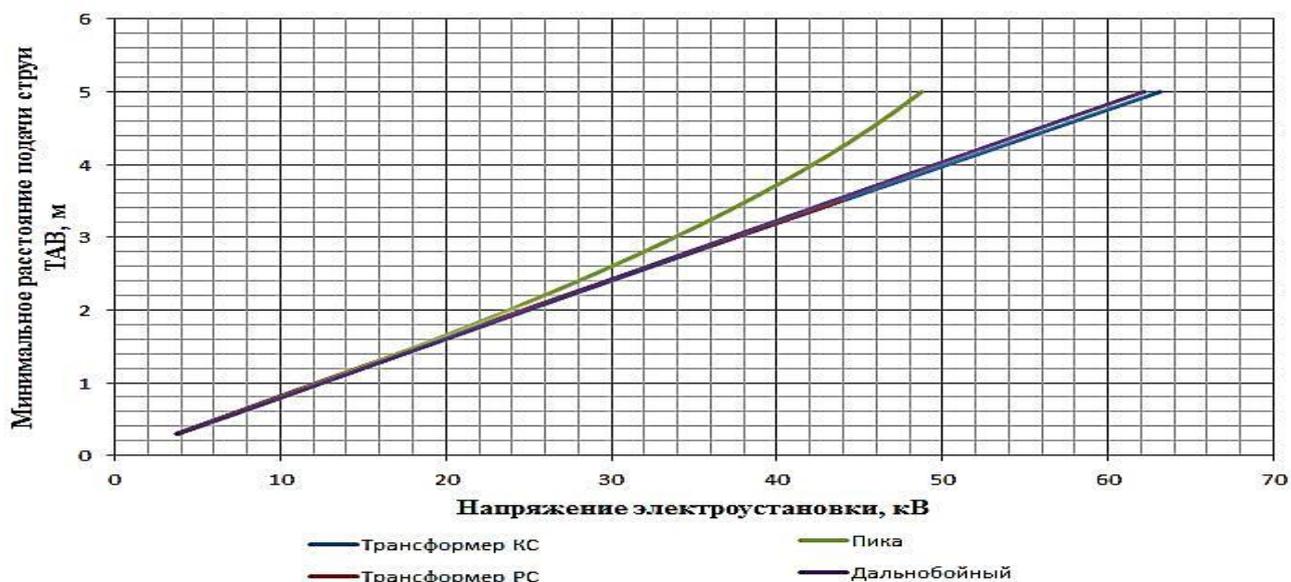


Рисунок 7 – Минимальные расстояния подачи струй температурно-активированной воды в зависимости от типа пожарного ствола и напряжения электроустановки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Открытые электрические эффекты генерации струями температурно-активированной воды нестабильного постоянного тока, влияющего на достоверность экспериментальных данных, не позволили применить для исследования эмпирические методики определения токопроводимости струй огнетушащих веществ.

2. Проведенный анализ физических процессов, основанный на теориях электротехники, электрических цепей, перколяции и многофазных потоков, позволил впервые разработать новый научно обоснованный экспериментально-аналитический метод и опытно-экспериментальный стенд для определения тока утечки и минимальных безопасных расстояний тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики, струями температурно-активированной воды.

3. Полученные на опытно-экспериментальном стенде и обработанные экспериментально-аналитическим методом данные свидетельствуют, что струи температурно-активированной воды фактически являются диэлектриками (изоляторами), и ток не проводят, а значит их применение безопасно при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики.

4. Сравнительный анализ токопроводимости струй различных огнетушащих веществ показал, что сила тока, протекающего через струи температурно-активированной воды, для всех исследованных стволов ниже на порядок — для тонкораспыленной воды, на 2–3 порядка — для распыленной воды и на 4–5 порядков — для компактных струй воды.

5. При практическом тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики необходимо учитывать влияния на ток, протекающий по струе температурно-активированной воды, электрической емкости между телом пожарного, работающего со стволом, и корпусом электроустановки. Эта особенность отражена в рекомендованных для практического использования зависимостях  $I_{\text{тушения}} = f(U_{\text{ЭУ}})$ .

**Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:**

1. Чистяков, Т.И. Применение теории цепей при анализе процессов тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики [Текст] / Т.И. Чистяков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 4. – С. 13–21. DOI: 10.25257/FE.2016.4.13-21

2. Чистяков, Т.И. Влияние геометрических параметров струй температурно-активированной воды на их комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е [Текст] / Т.И. Чистяков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 2. – С. 12–21. DOI: 10.25257/FE.2017.2.12-21

3. Чистяков, Т.И. Влияние электроперколяционных параметров струй температурно-активированной воды на их комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е [Текст] / Т.И. Чистяков, В.В. Роевко, С.П. Храмцов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 1. – С. 63–71. DOI: 10.25257/FE.2018.1.63-71

4. Чистяков, Т.И. Электробезопасность при тушении пожаров класса Е энергетических установок и помещений судов (кораблей) [Текст] / Т.И. Чистяков и др. // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т. 2. – № 2 (40). – С. 81–89.

**Остальные публикации по теме диссертации:**

5. Чистяков, Т.И. Мобильная установка пожаротушения температурно-активированной водой объектов энергетики [Текст] / Т.И. Чистяков, А.В. Пряничников, А.П. Кармес // Материалы IV Научн.-практ. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2015». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 138–142.

6. Чистяков, Т.И. Электрические процессы при тушении электроустановок температурно-активированной водой на объектах энергетики [Текст] / Т.И. Чистяков, В.Д. Федяев // Материалы всероссийской конф. и школы для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности – 2015». – Таганрог: ЮФУ, 2015. – С. 113–115.

7. Чистяков, Т.И. Преимущества применения температурно-активированной воды и огнетушащих веществ на ее основе, при тушении пожаров на объектах электроэнергетики [Текст] / Т.И. Чистяков, В.В. Роевко, В.А. Пряничников, С.П. Храпцов // Материалы V Международной научн.-практ. конф. «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 368–372.

8. Чистяков, Т.И. Исследование возможности подачи огнетушащих веществ для тушения электрооборудования под напряжением [Текст] / Т.И. Чистяков, В.Д. Федяев // Материалы V Международной научн.-практ. конф. «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 348–351.

9. Чистяков, Т.И. Энергетические аспекты применения автомобиля пожарного многоцелевого от ликвидации чрезвычайной ситуации в республике Крым до перспектив пожаротушения электроустановок под напряжением [Текст] / Т.И. Чистяков, В.В. Роевко, В.А. Пряничников, С.П. Храпцов // Материалы XXVI Международной научн.-практ. конф. «Предупреждение. Спасение. Помощь – 2016». – М.: Академия гражданской защиты МЧС России, 2016. – С. 85–90.

10. Чистяков, Т.И. Температурно-активированная вода — инновационная технология пожаротушения объектов электроэнергетики [Текст] / Т.И. Чистяков, А.И. Соковнин // Материалы IV Научн. конф. и школы для молодых ученых (с международным участием) «Системы обеспечения техносферной безопасности – 2017». – Таганрог: ЮФУ, 2017. – С. 241–243.

11. Чистяков, Т.И. Электрогеометрические параметры струй температурно-активированной воды [Текст] / Т.И. Чистяков // Материалы XXVI Международной научн.-техн. конф. «Системы безопасности – 2017». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 272–277.

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

Подписано в печать 07.10.2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 194.

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