

Н.А. Шергунова

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ  
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**



МОСКВА  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
2006

**УДК 621.315.614:621.332.3**

*Н.А. Шергунова* **Повышение надежности воздушных линий электропередачи распределительных сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 212 с. ISBN 5-283-03252-3**

Рассмотрены основные электрофизические свойства натуральной и пропитанной древесины изоляционных конструкций воздушных линий (ВЛ) и контактной сети (КС). Приведены результаты экспериментальных исследований гигроскопичности и электропроводности пропитанной различными химическими препаратами (антисептиками, консервантами и антипиренами) древесины сосны. Данные этих исследований позволили разработать модели гигроскопичности и электрического сопротивления комбинированной изоляции «фарфор-дерево» от климатических и защитных факторов. Изложен аналитический метод расчета электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины для равновесных условий, разработанный автором на базе теории многофазных (гетерогенных) и многокомпонентных сред. Рассмотрены вопросы надежности эксплуатации деревянных изоляционных конструкций ВЛ и КС. Предложена модель ожидаемого числа возгораний деревянных элементов опор линий продольного электроснабжения.

Книга предназначена для научных, инженерно-технических работников, специализирующихся в области многофазных, многокомпонентных сред, разработки рецептур защитных химических препаратов древесины и занимающихся исследованиями твердолокнистого диэлектрика, применяемого при эксплуатации электрических систем внешнего электроснабжения, а также для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов электрических специальностей вузов и техникумов.

**Рецензенты:** д.т.н., проф. В.Г. Гольдштейн и доцент В.В. Кудашев (Самарского государственного технического университета)  
д.т.н., проф. Д.Я. Носырев (Самарской государственной академии путей сообщения)

**Ил. 97+60. Табл. 29. Библиогр.: 191 назв.**

**УДК 621.315.614:621.332.3**

**ISBN 5-283-03252-3**

© Н.А. Шергунова

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. ПРИМЕНЕНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ.....	7
2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	14
2.1. Критерии электрической изоляции органических диэлектриков....	14
2.2. Качественная оценка электропроводности органических диэлектриков.....	20
2.3. Количественная оценка электропроводности электроизоляционных твёрдых волоконистых материалов на базе древесины.....	23
2.4. Анализ электропроводности пропитанной древесины.....	32
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАТУРАЛЬНОЙ И ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ.....	36
3.1. Методология экспериментальных исследований гигроскопичности и электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины.....	36
3.2. Результаты исследования гигроскопичности (влагопоглощения) древесины.....	44
3.3. Результаты исследования электрического сопротивления древесины.....	58
4. РАСЧЁТНЫЙ МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАТУРАЛЬНОЙ И ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ УЗЛА «ФАРФОР-ДЕРЕВО» ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ.....	85
4.1. Метод определения электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины сосны, при равновесных условиях.....	85
5. НАДЕЖНОСТЬ ДВУХЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СИСТЕМЫ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В РАЙОНАХ С ЗАГРЯЗНЕННОЙ АТМОСФЕРОЙ.....	96
5.1. Комбинированная изоляция «фарфор-дерево» воздушных линий на деревянных опорах.....	96
5.2. Состояние поверхности несущих и опорно-поддерживающих конструкций ВЛ, находящихся в эксплуатации.....	102
5.3. Исследование распределения потенциала по поверхности деревянных траверс.....	112
5.4. Механизм разрушения изоляционных конструкций из пропитанной древесины под действием высокого напряжения промышленной частоты.....	117

5.5. Разработка химической защиты ВЛ 10 кВ продольного электроснабжения.....	133
5.6. Оценка ожидаемого числа возгораний деревянных элементов опор линий продольного электроснабжения.....	139
6. МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ .....	145
6.1. Модель равновесной гигроскопичности пропитанной древесины от защитных и эксплуатационных факторов.....	145
6.2. Модель электрического сопротивления пропитанной древесины изоляционных конструкций ВЛ .....	151
6.3. Оптимизация выбора консервантов деревянных изоляционных конструкций ВЛ .....	157
Заключение.....	161
Библиографический список использованной литературы.....	162
Приложение 1.....	173
Приложение 2.....	176
Приложение 3.....	185

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время большое количество работ теоретического и прикладного характера посвящено выбору и эксплуатации воздушных линий (ВЛ) и открытых распределительных устройств (ОРУ) в районах с загрязненной атмосферой. В основном решение проблем эксплуатации затрагивает вопросы по совершенствованию изоляционных свойств комбинированной изоляции «фарфор-дерево». Состояние комбинированной изоляции «фарфор-дерево» зависит как от состояния изоляторов, так и деревянной изоляционной конструкции. Поэтому исследования по обеспечению надежной работы высоковольтной комбинированной изоляции «фарфор-дерево» ВЛ и КС должны быть направлены на решение вопросов по улучшению электроизоляционных свойств не только изоляторов, но и конструкционной древесины.

В настоящее время хорошо изучена импульсная прочность древесины, её диэлектрические свойства, а также вопросы, связанные с разрушением и возгоранием деревянных электроизоляционных конструкций ВЛ. Этот вид разрушения – катастрофа электрических сетей, которая обусловлена воздействием технического прогресса на окружающую среду.

Установлено, что древесина – комплекс естественных полимеров. Её основа – высокомолекулярная целлюлоза, являющаяся сложной структурной системой, образующей плотно переплетенную сетку из цепеподобных макромолекул и прослоенную аморфной упругоэластичной массой гемицеллюлозы и лигнина.

Сухая древесина является твердым диэлектриком, содержащим полярные группы, и поэтому обладает слабой электропроводностью. Из-за наличия в её порах воздуха делает древесину несовершенным изоляционным материалом. Её свойства сильно меняются в зависимости от условий окружающей среды, в связи с тем, что древесина содержит в большом количестве целлюлозу, являющуюся гидрофильным коллоидом с множеством капилляров. Этот факт позволяет характеризовать древесину, как сложную пространственную систему высокой гигроскопичности.

Динамика разрушения деревянных изоляционных конструкций ВЛ от токов утечки и представительный статистический анализ их повреждаемости в различных энергосистемах, вследствие этого явления, вскрыл основные факторы внешней среды, влияющие на изменение электрических свойств древесины.

Учеными разработаны совершенные методы расчета электрической изоляции различного оборудования, но в технической литературе отсутствуют теоретические основы расчета изоляционных свойств пропитанной древесины в зависимости от ее защитных свойств и влажно-температурного состояния, обусловленного усло-

виями окружающей среды и воздействием токов утечки, высокого напряжения. В этой связи, автор монографии предлагает результаты многолетних комплексных экспериментальных исследований гигроскопичности и электрического сопротивления натуральной и пропитанной органическими (масляными), минеральными (неорганическими), фенольными, хромсодержащими, медьсодержащими, комбинированными антисептиками, консервантами и антипиренами древесины в зависимости от климатических и эксплуатационных факторов. На основании полученных данных был разработан аналитический метод расчета электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины для равновесных условий.

Для оценки числа возгораний деревянных опор (ДО) продольного электроснабжения представлена математическая модель ожидаемого числа возгораний ДО. Разработаны модели равновесной гигроскопичности и электрического сопротивления древесины пропитанной антипиренами в зависимости от температурно-влажностных условий окружающей среды и защитных свойств препарата пропитки. Эти работы направлены на возможность повышения надежности высоковольтной изоляции комбинированного узла «фарфор-дерево».

В организации и проведении исследований автору помогли инженерно-технические работники ряда дистанций энергоснабжения Среднеазиатской, Туркменской и Северной железных дорог, сотрудники кафедры «Электроснабжение и микропроцессорное управление» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта, САО «Энергосетьпроект», «Электроаппарат» и Центрального научно-исследовательского института механической обработки древесины (г. Архангельск), ОАО «Белкомур», ОАО СЗ «Экран», Самарской государственной академии путей сообщения Г.С. Артеменко, Т.С. Сарыбаев, В.Н. Яковлев, В.А. Кравченко, А.М. Федоров, Ю.А. Варфоломеев, Н.А. Курбатова, В.И. Федотов, Д.В. Агапов, Н.Я. Першин, А.В. Ковтунов.

Автор выражает глубокую благодарность рецензентам В.Г. Гольдштейну, В.В. Кудашеву и Д.Я. Носыреву за внимательное прочтение рукописи, высказанные замечания и предложения.

## **1. ПРИМЕНЕНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ**

Широкое и разнообразное применение древесины объясняется редким сочетанием в этом природном материале многих положительных качеств. Растёт потребность в древесине, используемой в качестве изолирующих и опорно-поддерживающих конструкций воздушных линий (ВЛ), контактной сети (КС), высоковольтно-сигнальных воздушных линий сигнализации, централизации и блокировки (ВСЛ СЦБ), в цепях продольного электроснабжения (ПЭ), опорных и крепежных деталях трансформаторов, пазовых клиньев электрических машин. Древесина применяется, как сырьё для химической и химико-механической переработки в листовые и плитные материалы - бумаги, картона, древесностружечных и древесноволокнистых плит и других композитов.

Линии электропередачи - одна из немногих сфер строительства, где древесина может эффективно применяться в качестве изолирующих конструкций без значительной переработки. Применение деревянных опор (ДО) обусловлено, главным образом, богатством лесных ресурсов России, небольшой стоимостью древесины, её достаточно высокой механической прочностью, а также круглым природным сортаментом, обеспечивающим простоту конструкций и наименьшее сопротивление ветровым нагрузкам.

Необходимо учесть и другие достоинства древесины: меньшая стоимость по сравнению с металлическими и железобетонными опорами; большая перегрузочная способность; увеличивающая надёжность работы конструкций, особенно в районах с интенсивным образованием гололёда; изоляционные свойства, повышающие грозоупорность линий; отсутствие особых требований при перегрузке и разгрузке деталей, простота обработки, меньший объем перевозок в процессе строительства.

Грозозащитный трос на линиях электропередачи, выполненных на деревянных опорах, не подвешивается, так как почти все удары молнии в линию попадают в фазные провода. При этом необходимая грозоупорность линии обеспечивается малой вероятностью перехода импульсного перекрытия междуфазной изоляции в силовую дугу, что связано с высокой импульсной прочностью деревянных опор. В сети с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через дугогасящую катушку ток однофазного замыкания на землю существенно меньше, чем в сети с эффективно заземленной нейтралью. Это ведет к значительному снижению вероятности образования устойчивой дуги. Однако остается опасность междуфазного перекрытия. Для снижения вероятности перехода импульсного перекрытия в дугу во всех случаях целесообразно увеличивать длину пути перекрытия. На линиях с деревянными опорами использует-

ся импульсная прочность дерева, которая существенно увеличивает длину пути междупазного перекрытия и уменьшает градиент рабочего напряжения вдоль пути перекрытия. Высокие электроизоляционные свойства древесины позволяют подвешивать на деревянных опорах меньшее количество подвесных изоляторов, чем на металлических или железобетонных, а на ВЛ 20 кВ использовать лёгкие и дешёвые штыревые изоляторы.

В настоящее время древесина продолжает оставаться конкурирующим металлу и железобетону материалом в электросетевом строительстве, как в нашей стране, так и за рубежом. Столбовая древесина широко используется в США, Канаде, и ряде европейских стран в строительстве не только линий 20-35 кВ, но и более высокого напряжения. В России, США, Канаде, Швеции и Финляндии на ДО сооружают ВЛ напряжением до 220 кВ. В США на ДО построены опытные участки ВЛ 330 и 460 кВ и в России аналогичные опоры разработаны для ВЛ 330 и 500 кВ. В Японии большинство ЛЭП напряжением до 60 кВ сооружено на деревянных опорах. Даже в малолесных странах ДО находят широкое применение [1, 2-4, 5, 6, 7-9].

В энергосистемах России ДО из сосны и лиственницы широко применяют на ВЛ напряжением до 220 кВ включительно. В.С. Рашкес [10] приводит практические рекомендации по использованию изоляционных свойств дерева при выборе изоляторных гирлянд линий 110-500 кВ на ДО. В настоящее время протяженность электрических сетей средних классов напряжения в России и странах СНГ составляет около 4 млн. км [50]. Распределительные сети 10 кВ являются наиболее массовыми. Протяженность ВЛ 10 кВ равна более 1,5 млн. км [11].

По данным И.Г. Барга [12], протяженность ВЛ напряжением 35-750 кВ в энергосистемах возросла с 445,6 до 852,6 тыс. км (т.е. в 1,9 раза). Темпы развития магистральных и межсистемных ВЛ 330-750 кВ превышают таковые распределительные ВЛ 35-220 кВ (протяженность первых возросла в 2,2, а вторых в 1,9 раза). Однако использование древесины в опорах ВЛ 35-220 кВ сокращается и в относительных, и в абсолютных величинах. За 15 лет протяженность ВЛ 35-220 кВ на ДО уменьшилась с 142 до 123 тыс. км, а протяженность воздушных электрических сетей энергоуправлений напряжением 35 кВ и выше, по данным [11], составляет 1024,8 тыс. км.

По П.М. Шилкину [13], протяженность железнодорожных линий продольного электроснабжения МПС напряжением 6 - 35 кВ равна 196,7 тыс. км, основных ВЛ СЦБ, обслуживаемых участками электроснабжения, - около 80 тыс. км, а линий продольного электроснабжения, от которых осуществляется резервное питание устройств автоблокировки, более 35 тыс. км [14].

Электрические свойства древесины играют большую роль при решении проблемы грозоупорности линий электропередачи 35÷220 кВ и более на деревянных опорах и их возгораемости от токов утечки и т.п. Вместе с тем, своеобразные и ещё мало изученные особенности древесины не позволяют использовать её с должным эффектом, вызывают необходимость обеспечения специалистов различных отраслей производства достоверной информацией о характеристиках электрофизических и механических свойств конструкционной древесины, особенно, в электросетевом строительстве.

На железных дорогах России эксплуатируется более 1,4 миллионов различных типов опор контактной сети, из которых около 90% составляют железобетонные. По данным [15, 16] в 1996г. на них приходилось до 10% всех повреждений контактной сети. Опоры составляют значительную долю в стоимости всех подсистем контактной сети. Однако со временем наступает старение бетона и арматуры опор, в связи с чем, на действующих участках железных дорог в среднем ежегодно заменяется 5,1 тыс. этих конструкций. Одновременно с этим решается вопрос об опорах для электрификации новых участков, в том числе высокоскоростных магистралей.

Многокритериальный подход рационального применения опор из различных материалов предполагает разработку развернутой системы технико-экономических показателей, в которой в качестве решающего показателя, характеризующего экономическую эффективность конструкций, применяется показатель приведенных затрат, а в качестве дополнительных: расход материалов, масса, эксплуатационные расходы и др.

Система должна учитывать также комплекс других факторов: технический уровень изготовления, экономико-географические, социально-экономические, экологические (в основном связанные с утилизацией арматуры ЖБО и фундаментов, находящихся в эксплуатации), влияющих на эффективность, выбор материала конструкций, и конструктивных форм.

Учет региональных возможностей и особенностей необходим при разработке эффективных мероприятий по унификации и типизации опор, стимулировании повышения качества их разработки, совершенствования конструкций и оптимизации параметров унифицированных конструкций; типовых рекомендаций по изменению границ эффективного применения взаимозаменяемых конструкций опор из различных материалов, обусловленных различным, уровнем цен, затрат на транспортирование и другими факторами.

Достоинством ДО являются: меньшая (в 4-5 раз) масса вследствие относительно более высокой удельной прочности древесины по сравнению с бетоном; лучшая транспортабельность; удобство при монтаже; повышенная долговечность при эксплуатации в химически агрессивных средах; меньшая теплопроводность; невысокий

коэффициент линейного расширения и пониженная электропроводность. Удельная прочность древесины при растяжении вдоль волокон примерно такая же, как и у высокопрочной стали. Меньшая зависимость себестоимости и фондоемкости изготовления от серийности и другие преимущества делают натуральную древесину наиболее целесообразным материалом для сооружения изоляционных конструкций ВЛ и КС.

Анализ технико-экономических показателей опор линий электропередачи из различных материалов показывает, что ДО вполне конкурентоспособны, а во многих случаях (по ряду экономических, инженерно-технических и чисто конъюнктурных соображений) их применение на ВЛ 0,4-10 кВ эффективнее, чем железобетонных [29, 51]. Запас прочности ДО в 2-3 раза выше, чем ДО на железобетонных приставках и железобетонных опорах [176], близких друг другу с точки зрения механической прочности. Эффективность ДО возрастает при сроке службы свыше 16 лет. По данным [17, 18] применение ДО на ЛЭП 35 кВ снижает стоимость линий в 1,5 - 2,7 раза, а годовые расчетные затраты по ним - в 1,3 - 2,1 раза. На линиях 110-220 кВ использование ДО снижает капиталовложения в 1,2-1,5 раза а годовые расчетные затраты на 2 - 27%. Стоимость ЛЭП на металлических опорах (МО) в среднем выше на 30%, чем на железобетонных (ЖБ) и на 50%, чем на ДО. Стоимость линий на ЖБ опорах выше на 20%, чем на ДО. Все цифры, приведенные в [18] определены для существующих ЛЭП 110 и 220 кВ. ДО дешевле железобетонных и металлических опор, но не менее долговечны. Стоимость замены одной ЖБ опоры КС по сведениям ВНИИЖТа составляет 4 млн. руб. [19].

Глубокие и всесторонние исследования древесины необходимы для совершенствования и создания новых электроизоляционных материалов, применяемых в системах электрической изоляции, разработки рациональных типов деревянных траверс и брусьев типа: ТВО, ТВ, ТСО и ТС, Б [20]; деревянных кронштейнов ДО, ДНО, ДНОУ [21, 22], устанавливаемых на опорах КС для питания нетяговых потребителей; опорно-поддерживающих конструкций воздушных линий; улучшения природных свойств и изыскания новых областей применения древесины.

К основным недостаткам деревянных конструкций ЛЭП следует отнести: подверженность загниванию и в этой связи меньший срок службы при эксплуатации в условиях повышенной влажности и возгораемость при низовых пожарах, от прямых ударов молнии или от токов утечки по изоляторам. Однако эти недостатки могут быть существенно уменьшены путем антисептирования, консервирования и антипирирования.

Основные повреждения деталей деревянных изоляционных конструкций, кроме гниения и возгорания, имеют механический ха-

рактен, связанный: с превышением величин внешних нагрузок расчетным значениям, наездами на опоры и обрывами проводов высокогабаритными механизмами [3, 23, 26].

Одним из важных моментов рационального и экономичного использования лесных материалов является повышение срока службы изделий и объектов, выполненных из древесины. Древесина в эксплуатации подвержена воздействию и разрушению разнообразными факторами: климатическими, агрессивными средами (атмосферными, почвенными, биологическими, подводными) и др. Поэтому недооценка роли химической защиты древесины приносит производству значительный ущерб. По литературным данным, ежегодные потери из-за неполноты защитных работ оцениваются в 1,5 млрд. руб. Для заготовки 20 млн. м<sup>3</sup> древесины, идущей на противогнилостный ремонт, ежегодно неоправданно вырубается 300 тыс. га леса [24].

Основной принцип защиты древесины воздушных линий и контактной сети от биоразрушения заключается в том, что древесину подвергают пропитке химическими препаратами. Применение эффективных химических средств защиты и способов пропитки древесины позволяют продлить срок службы опор от 30-35 до 50 лет, а также сократить трудоемкость обслуживания ВЛ на ДО и обеспечить экономическую эффективность их применения [5, 25-28, 30, 31].

В настоящее время в нашей стране продолжают работы по совершенствованию технологии и средств химической защиты древесины от биологического поражения и возгорания. Способы защиты деревянных конструкций ВЛ и сооружений от биоразрушения отечественными и зарубежными средствами химической защиты приведены в [25, 32-35].

Качество и надежность защиты во многом зависит от глубины пропитки древесины. Наиболее качественную и глубокую пропитку можно обеспечить с помощью современных автоклавных установок [36, 37, 38, 39, 40, 41-49].

Для правильного понимания проблемы биоразрушения деревянных изоляционных конструкций и опор ВЛ важное значение имеет обмен опытом эксплуатации ДО энергосистемами и координации работ по её ограничению. Исследованиями результатов 10-летней эксплуатации ДО в нескольких энергосистемах установлено, что срок службы деревянных элементов опор ВЛ 35-110 кВ вследствие некачественной пропитки древесины в 3-4 раза ниже нормативного. Интенсивному загниванию подвержены пасынки и траверсы энергосистем Урала. Так, из установленных 98,4 тыс пасынков и 36,4 тыс. траверс за 1949-1968 гг. гнилых пасынков было сменено 63,7 тыс. (65%), траверс – 30 тыс. (82,7%). Предлагаются два направления борьбы за продление сроков их службы, одним из которых является эффективная профилактика ДО с помощью дополнительной подпит-

ки химическими препаратами деревянных деталей изоляционных конструкций [145].

Другая проблема повышения надежности ВЛ и КС сосредоточена в области защиты древесины от разрушения токами утечки. Среди повреждений ВЛ по вине эксплуатации 60% составляет загнивание древесины и 20% - возгорание деревянных опор [26, 51]. Проблеме возгорания и защите ДО ВЛ от воздействия токов утечки посвящены работы [26, 52].

Древесина – диэлектрик, изоляционные свойства которого в значительной степени зависят от его состояния. Так участок деревянной траверсы между точкой подвеса гирлянды и заземляющим спуском на ДО с тросами может рассматриваться как дополнительная изоляция провода относительно земли. Точно также участок деревянной траверсы между двух гирлянд на ДО без тросов является дополнительной междуфазной изоляцией. Участки деревянных траверс на деревянной опоре, соединенные последовательно с изолятором или гирляндами, образуют изоляцию «фарфор-дерево».

Особое внимание при выборе и эксплуатации ВЛ в районах с загрязненной атмосферой уделяется проблеме исследования электроизоляционных свойств изделий из керамики, стекла или пластмассы, оставляя без внимания ее вторую часть - капиллярно-пористый материал - древесину. Однако даже значительные достижения в области изоляторостроения не смогли снять остроты этой проблемы, например линия электропередач ЛЭП 6-220 кВ и выше, в которых разрядные характеристики изоляции определяются состоянием комбинированной изоляции «фарфор-дерево», т. е. изоляционными свойствами древесины.

Обеспечение надежной оптимальной работы изоляции воздушных линий, невозможно без учета свойств и характеристик каждого изолирующего элемента комбинированной изоляции «фарфор-дерево», как в отдельности, так и в комплексе. Немаловажен и тот факт, что в работах посвященных исследованию координации изоляции «фарфор-дерево» остается без внимания такой важный фактор, существенно влияющий на электрофизические свойства древесины, как пропитка химическими защитными препаратами.

Волокнистые органические материалы растительного происхождения (дерево, бумага, фибра и др.) обладают следующими свойствами: высоким удельным сопротивлением в сухом состоянии и резко пониженным в увлажнённом состоянии; значительной и неустранимой гигроскопичностью; малой рабочей температурой, не выше 105°С; старением при более высокой температуре; уменьшением механической прочности с течением времени; невысокой пробивной напряженностью в непропитанном состоянии.

Многочисленными исследованиями установлено, что чем больше электроизоляционный материал поглощает влаги, тем ниже становятся его электрические характеристики.

Подводя итог вышеизложенному, отметим, что для реализации поставленных целей была выполнена следующая программа основных научных исследований.

Во-первых, для того, чтобы разработать и внедрить на практике законченную количественную теорию расчета электропроводности гетерофазных, твёрдопористых волокнистых материалов на базе натуральной древесины, был использован весь научный опыт по этому вопросу. Были выполнены обширные комплексные экспериментальные исследования влияния температуры и относительной влажности воздуха, вида и концентрации химической защитной пропитки на характер изменения гигроскопичности (влагостойкости) и электропроводности древесины, с учётом факторов воздействующих на неё, особенно в условиях эксплуатации ВЛ и КС.

Во-вторых, был обоснован основной критерий влагостойкости натуральной и пропитанной древесины, которая широко используется в качестве изолирующих и опорно-поддерживающих устройств воздушных линий, линий связи, контактной сети электрифицированных железных дорог, линий электропередачи и воздушных линий продольного электроснабжения (цепь ПЭ), которым является удельное объемное сопротивление.

В-третьих, на основе данных эксперимента обоснован выбор эффективных современных защитных препаратов, повышающих влагостойкость и изоляционные свойства конструкционной древесины сосны, и они рекомендованы к внедрению на практике. Обоснованы требования к химическим средствам защиты несущих, опорно-поддерживающих конструкций ВЛ и КС от разрушения в различных средах эксплуатации.

## 2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1. Критерии электрической изоляции органических диэлектриков

Многочисленными исследованиями установлено, что чем больше электроизоляционный материал поглощает влаги, тем ниже становятся его электрические характеристики. Однако механизм поглощения влаги для различных органических материалов, отличающихся по своей структуре и химическому составу, различный. Поэтому ниже будут рассматриваться критерии органической изоляции и изоляции твердопористых волокнистых материалов на базе древесины. Согласно классификации П.А. Ребиндера натуральная древесина рассматривается как капиллярно-пористое коллоидное тело. Влага, содержащаяся в теле, в основном связана капиллярными силами и осмотически или структурно. На внутренних стенках огромной сети субмикроскопических капилляров и открытых пор адсорбируются слои молекул воды. В тонких капиллярах наблюдается капиллярная и полимолекулярная конденсация влаги. Стенки капилляров древесины эластичны и при поглощении влаги набухают [53].

Наиболее распространёнными критериями электрической изоляции органических диэлектриков по утверждению В.В. Маслова [54] являются: водо- или влагопоглощаемость, угол смачивания поверхности диэлектрика водой, константы диффузии влаги в диэлектриках, изменение диэлектрической проницаемости или тангенса угла диэлектрических потерь, изменение диэлектрической прочности и величина удельного объёмного электрического сопротивления. Отношение специалистов, занимающихся проектированием, разработкой и испытанием электроизоляционных материалов и систем изоляции электрических изделий, к выше приведенным критериям в разных аспектах указывает на отсутствие единых мнений, особенно в установлении определения критериев, связанных с увлажнением изоляции. Ниже отдаётся предпочтение анализу различных критериев оценки электроизоляции пористых материалов, признанных среди специалистов.

**Влагопоглощение** (гигроскопичность) характеризует способность материала поглощать водяные пары (влагу) из окружающего воздуха. Не все компоненты древесины обладают одинаковой сорбционной способностью. Так, у гемицеллюлозы эта способность выражена в большей мере, чем у целлюлозы, а у лигнина ещё меньше чем у последней. Влагопоглощение происходит в результате моно-полимолекулярной сорбции паров внутренней поверхностью кле-

точных стенок древесины и конденсации паров в микрокапиллярах [55].

Взаимосвязь количества поглощённой влаги с давлением паров воды, окружающих материал, и количеством паров воды, растворившихся в нём, подчиняется закону Генри:

$$C = h \cdot p, \quad (1)$$

где  $C$  – количество поглощённой влаги,  $\text{кг/м}^3$ ;  $p$  – давление паров воды, Па;  $h$  – коэффициент растворимости,  $\text{кг/м}^3 \text{ Па}$  [56].

Закон Генри справедлив обычно для растворов малой концентрации, причем растворяющееся вещество не должно вступать в химическое взаимодействие с молекулами растворителя, диссоциировать и ассоциировать.

Другим типом активированной диффузии является сорбция, не подчиняющаяся закону Генри. В этом случае зависимость концентрации растворенного вещества  $C$  от давления имеет более сложный характер

$$C = h p^n. \quad (2)$$

При высокой относительной влажности рост концентрации происходит значительно быстрее, чем по закону Генри, и поэтому показатель  $n > 1$ . Это отклонение для полярных материалов от закона Генри вызывается наличием сильного взаимодействия с молекулами воды или наличием в материале водорастворимых примесей.

Диффузия молекул воды внутри полярного диэлектрика осложняется тем, что в них имеются дипольные молекулы, которые закрепляются возле полярных радикалов. Коэффициент растворимости для полярных материалов с ростом температуры обычно падает [53].

Для активированной сорбции характерно молекулярное перемещение влаги внутри материала по законам диффузии, по законам Фика [57]

$$P = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial X} \quad (3)$$

и

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}, \quad (4)$$

где  $P$  - коэффициент влагопроницаемости;  $D$  - коэффициент диффузии;  $C$  - концентрация влаги;  $X$  - толщина материала;  $t$  - время.

Уравнение (3) относится к стационарному состоянию потока паров воды через единицу поверхности и позволяет определить скорость проникновения диффундирующего вещества, выраженную через градиент концентрации, и постоянную, называемую коэффициентом диффузии. Уравнение (4) относится к нестационарному состоянию потока паров воды и позволяет определить величину коэффициента диффузии  $D$ .

В случае соблюдения закона Генри из основных законов диффузии вытекает известное соотношение [53, 54].

$$P = h D, \quad (5)$$

где  $P$  – коэффициент влагопроницаемости, характеризующий прохождение паров воды сквозь диэлектрик, кг/(м<sup>3</sup>·с·Па);  $D$  – коэффициент диффузии, определяющий скорость процесса сорбции (точнее абсорбции), м<sup>2</sup>/с;  $h$  – коэффициент растворимости, характеризующий процесс сорбции (точнее, абсорбции) влаги, кг/(м<sup>3</sup>·Па).

Коэффициенты  $P$ ,  $D$  и  $h$  – основные влажностные характеристики органических электроизоляционных материалов.

Фундаментально теория диффузии представлена в монографии [57], где Р. Беррером было определено, что значения констант диффузии подчиняются экспоненциальному закону и выражаются следующим образом

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{E_D}{RT}}; \quad (6)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{E_P}{RT}}; \quad (7)$$

$$h = h_0 \cdot e^{-\frac{E_h}{RT}}, \quad (8)$$

где  $E_D$ ,  $E_P$ ,  $E_h$  – энергия активации, соответственно процессов диффузии, проницаемости и растворимости;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $D_0$ ,  $P_0$ ,  $h_0$  – значения  $D$ ,  $P$ ,  $h$  при начальной температуре.

Значения  $P$  и  $D$  с увеличением температуры возрастают.

Поскольку из уравнения (5)

$$h = \frac{P}{D}; \quad (9)$$

то, следовательно

$$E_h = E_D - E_P; \quad (10)$$

т.е. энергия активации процесса растворения может быть положительной и отрицательной, а значения  $h$  с ростом температуры могут и уменьшаться и расти.

Таким образом, если процесс увлажнения диэлектрика связан с диффузионными процессами, то в [54] предлагается оценивать влажностность электроизоляционных материалов по величине влажностных констант. Способы определения констант диффузии подробно описаны М.М. Михайловым в [53].

Д. Эндрюс и А. Джонсон [58] предложили, исходя из решения уравнения (4), формулу для вычисления коэффициента диффузии

$$\frac{Q}{Q_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{D\pi^2\tau}{d^2}}, \quad (11)$$

где  $Q$  – количество влаги, поглощённое за время  $\tau$ ;  $Q_\infty$  – количество влаги, поглощённое образцом в состоянии равновесия;  $d$  – половина толщины образца.

Преобразовав (11) и взяв логарифм, получим

$$\begin{aligned} \frac{D\tau}{d^2} &= -\frac{4}{\pi^2} \cdot \lg \frac{8}{\pi^2} \left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right) = \\ &= -0.0851 - 0.933 \cdot \lg \left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Зная равновесные значения влагопоглощения, можно определить коэффициент растворимости

$$h = \frac{Q_\infty \gamma}{GP}, \quad (13)$$

где  $P$  – парциальное давление, Па;  $G$  – первоначальный вес образца кг;  $\gamma$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Зная  $D$  и  $h$  можно определить все три влажностные характеристики  $P$ ,  $D$  и  $h$ . Константы диффузии зависят от плотности упаковки молекул, химического состава и надмолекулярной структуры материала. Если материал является только барьером для проникновения влаги, то значения констант диффузии могут быть связаны с влагозащитными свойствами [59, 60].

Б.И. Борисов и Н.А. Мощанский предложили формулу расчета коэффициента диффузии [61, 62]

$$D = \frac{\lambda d^2}{14400\pi^2}, \quad (14)$$

где

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^n \left[ \left( -\ln \frac{Q_\infty Q_i}{Q_\infty} \right) t_i \right]}{\sum_{i=0}^n t_i^2}, \quad (15)$$

$Q_i$  - привес образца через определенный промежуток времени, %.

Законом Фика и вытекающими из него соотношениями можно пользоваться и для материалов, не подчиняющихся закону Генри, но величины влажностных констант определяют тогда при насыщении влагой вещества.

Таким образом, по утверждению М.М. Михайлова [53] электроизоляционные материалы в условиях повышенной влажности среды ведут себя по-разному. Так у материалов, обладающих гигроскопичностью и смачиваемостью, при увеличении относительной влажности воздуха наблюдается уменьшение удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивления. Знание формы и видов

связи влаги с диэлектриком помогает объяснить многие явления, связанные с увлажнением электроизоляционных материалов.

**Гидрофобизация диэлектриков** – эффективный метод их влагозащиты, основан на увеличении водоотталкивания и уменьшения смачиваемости их. Гидрофобизация уменьшает контакт капли жидкости с поверхностью материала, что увеличивает удельное поверхностное сопротивление и не нарушает газопроницаемости диэлектрика. Однако сама величина угла смачивания материала, как показали исследования, не может служить критерием влагостойкости. Следует отметить, что при испытании материалов в воде, в условиях влажности воздуха и при различных температурах, значение углов смачивания изменялись, что связано со структурными изменениями материалов и появляющимися новыми энергетическими соотношениями на границе поверхности материалов с водой. По тенденции изменения углов смачивания можно прогнозировать поведение данного материала при неоднократной сушке и увлажнении [54, 56, 63, 64, 65].

**Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$**  любого технического диэлектрика при увлажнении заметно возрастает. Однако величина  $\varepsilon$  зависит от формы распределения влаги и формы её связи с материалом, поэтому величина  $\varepsilon$  увлажнённого диэлектрика не может однозначно являться критерием влаго- и водостойкости. Для комплекса изоляции (изоляционной системы) прирост  $\varepsilon$  в процессе увлажнения весьма заметен и может служить критерием увлажнения изоляции изделия.

Диэлектрическая проницаемость абсолютно сухой древесины с увеличением плотности существенно изменяется. Вдоль волокон величина  $\varepsilon$  выше, чем поперек. С повышением влажности древесины значение  $\varepsilon$  увеличивается. С увеличением температуры от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  поперек волокон абсолютно сухой древесины увеличивается в диапазоне частот  $10^2 \div 10^{10}$  Гц в 1,2; 1,3 раза [66-67].

**Тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$**  при увлажнении диэлектрика, как правило, растёт тем больше, чем больше влаги поглощает материал. Однако по утверждению В.В. Маслова значения  $\text{tg } \delta$  не всегда может быть критерием влагостойкости органических полимерных диэлектриков [31]. Величина  $\text{tg } \delta$  древесины зависит от её плотности, частоты электрического поля, его направления относительно волокон и влажности. Диэлектрические параметры древесины по обобщённым данным Г.И. Торговникова [67] в основном важны в технологии тепловой обработки древесины в поле СВЧ [68, 69].

**Электрическая прочность** – наиболее существенный критерий влаго- и водостойкости изоляционного материала или системы изоляции. Факторы, характеризующие увлажнение изоляционного ма-

териала (удельное сопротивление,  $\text{tg } \delta$ ), могут стать первостепенными в качестве факторов, предшествующих пробой. Но не существует прямой зависимости между величинами электрического сопротивления или  $\text{tg } \delta$  и электрической прочностью материала. Отмечается, что при больших значениях удельного объёмного сопротивления и низком  $\text{tg } \delta$ , наблюдающихся у увлажнённого материала, электрическая прочность становится довольно низкой.

Электрическая прочность зависит от химического состава материала, молекулярной и надмолекулярной структуры, степени увлажнения, частоты и вида приложенного напряжения, толщины образца или материала в системе изоляции, степени старения материала, чистоты и ровности поверхности материала и т.д. Однако стойкость диэлектрика к воздействию ряда факторов не позволяет судить о реально изменившейся величине электрической прочности. Поэтому величину электрической прочности неудобно принимать за критерий влагостойкости материала в основном из-за того, что метод проверки является разрушающим, необратимым и требует большого количества образцов.

Электрическая прочность древесины меньше, чем электрическая прочность других твердых электроизоляционных материалов. При повышении влажности древесины электрическая прочность снижается, при этом уменьшается различие в значениях электрической прочности вдоль и поперек волокон [55, 70].

Во всех нормативных технических документах, оговаривающих влагостойкость изделия, величина сопротивления изоляции используется в качестве важнейшего критерия его влагостойкости.

**Электропроводность диэлектриков** в [53 - 56, 70] рассматривается как диффузионный процесс, так как носители тока (заряженные частицы) вынуждены диффундировать через среду диэлектрика под влиянием градиента электрического поля. Плотность электрического тока связана с концентрацией частиц-носителей, и сам электрический ток представляет собой перемещение этих частиц. Удельное объёмное сопротивление диэлектрика тесно связано с влагопоглощением, константами диффузии, условиями окружающей среды (влажность воздуха) и может служить основным критерием влагостойкости.

## 2.2. Качественная оценка электропроводности органических диэлектриков

Электропроводность твердых диэлектриков имеет такой же вид, как и для жидких диэлектриков, т.е.

$$\gamma = \frac{nq^2 \delta v}{6kT} e^{-\frac{U}{kT}}, \quad (16)$$

где  $n$  - число носителей зарядов;  $q$  – величина заряда;  $\delta$  – длина свободного пробега заряженной частицы;  $v$  – частота тепловых колебаний;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $U$  - энергия активации заряженной частицы [71, 72].

Величина  $\gamma$ , определяемая по (16), зависит от длительности нахождения образца под напряжением и температуры, при которой производилось ее измерение.

Определение электропроводности, характерной для каждого материала, представляет известные трудности, так как величина её определяется из уравнения

$$\gamma = \frac{T}{U}, \quad (17)$$

или с учётом ЭДС поляризации  $P$

$$\gamma = \frac{T}{U - P} \quad (18)$$

и зависит от факторов, указанных выше.

Диссоциирующие на ионы примеси в воде, диссоциирующие в воде растворимые примеси материала, диссоциирующие в результате высокой диэлектрической проницаемости воды молекулы самого диэлектрика, водородные и гидроксильные ионы диссоциированной воды - инжекция носителей зарядов, инициирующих увеличение электропроводности в увлажнённом диэлектрике [72].

Общая удельная проводимость увлажнённого диэлектрика определяется уравнением, предложенным В.В. Масловым [54]

$$\gamma_{o\delta} = \frac{1}{6kT} \left( C_i D_i q_i^2 e^{-\frac{U_i}{kT}} + C_d D_d q_d^2 e^{-\frac{U_d}{kT}} \right), \quad (19)$$

где  $C$  - концентрация заряженных частиц;  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $D$  - коэффициент диффузии заряженной частицы.

Индексом "д" в (19) обозначают все величины, относящиеся к носителям зарядов, дополнительно появившимся в результате процессов диссоциации в увлажнённом диэлектрике.

При электрофорезе и электроэндосмосе общая удельная проводимость определяется уравнением

$$\gamma_{o\delta} = \frac{I}{6kT} \left( C_i D_i q_i^2 e^{-\frac{U_i}{kT}} + C_B D_B q_B^2 e^{-\frac{U_B}{kT}} \right). \quad (20)$$

Индексом "в" в (20) обозначают все величины, относящиеся к частицам воды, находящимся в увлажнённом диэлектрике.

Учитывая, что  $D = \delta^2 v$ , анализ электропроводности увлажнённого диэлектрика удобно выполнять по формуле

$$\begin{aligned} \gamma_{o\delta} &= \frac{I}{6kT} \left( C_i D_i q_i^2 e^{-\frac{U_i}{kT}} + C_D D_D q_D^2 e^{-\frac{U_D}{kT}} + C_B D_B q_B^2 e^{-\frac{U_B}{kT}} \right) = \\ &= \frac{I}{6kT} \left( C_i \delta_i^2 v_i q_i^2 e^{-\frac{U_i}{kT}} + C_D \delta_D^2 v_D q_D^2 e^{-\frac{U_D}{kT}} + C_B \delta_B^2 v_B q_B^2 e^{-\frac{U_B}{kT}} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Анализ выражения (21) показывает, что увеличение электропроводности увлажнённого диэлектрика зависит от энергии активации частицы, их концентрации, коэффициентов диффузии и величины зарядов частиц-носителей. Следовательно, удельное объёмное сопротивление увлажнённого диэлектрика может однозначно являться основным критерием влагостойкости электроизоляционного материала.

В работе [73] впервые предложена универсальная формула определения удельной электропроводности водной (жидкой) плёнки, образовавшейся на поверхности твёрдопористых волокнистых диэлектриков в результате выпадения дождя или росы, таяния снега по формуле

$$\lambda = 2 \sum \frac{(Z_S e)^2 C_S}{6\pi\mu\delta_S m_S} \alpha_S, \quad (22)$$

где  $C_S$  – концентрация  $S$ -го компонента раствора соли в жидкой (водной) плёнке;  $Z_S$  – валентность  $S$ -го иона;  $e$  – абсолютная величина заряда электрона;  $\mu$  – вязкость жидкости;  $\delta_S$  – характерный размер (радиус)  $S$ -го иона;  $m_S$  – его масса;  $\alpha_S$  – степень диссоциации.

Так, например, вода (полярный диэлектрик, её диэлектрическая проницаемость при комнатной температуре составляет около 81) оказывает сильное диссоциирующее действие на многие соединения и растворяет их с образованием электролитов. Совершенно чистая вода благодаря влиянию самодиссоциации уже имеет заметную электропроводность:  $\gamma \approx 4,27 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при  $t=18^\circ\text{C}$ ; достаточно растворить в ней 0,07% KCl, чтобы электропроводность повысилась до  $7,27 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [56].

В настоящее время в отечественной литературе наиболее фундаментально исследована влагостойкость электрической изоляции на основе органических материалов-полимеров [53, 72, 73] при ги-

дрофобизации диэлектриков различными кремнийорганическими соединениями [63].

На основе обширных экспериментальных исследований поверхностного сопротивления полимеров установлено, что эта величина в основном зависит от количества адсорбированной на их поверхности влаги и от содержания водорастворимых примесей, имеющих в результате загрязнений в самом диэлектрике, на их поверхности или в окружающем воздухе.

Поверхностное сопротивление определяется не абсолютной, а относительной влажностью воздуха, чем больше влаги адсорбирует поверхность, тем выше поверхностная электропроводность [53, 54, 74 - 76]. Рост температуры увеличивает подвижность ионов в водной среде, адсорбированной на поверхности диэлектрика, в результате чего резко падает поверхностное сопротивление. При длительном увлажнении диэлектрика на общее поверхностное сопротивление всё большее влияние оказывает объёмное сопротивление. На величину поверхностного сопротивления оказывает сильное влияние химический состав материала и качество самой её поверхности [77]. При невысоких значениях влажности влияние на поверхностное сопротивление оказывает также твердость материала. Чем тверже материал, тем выше значение поверхностного сопротивления в сухом состоянии [71, 72, 76 - 78].

В условиях повышенной влажности воздуха определяющими факторами, влияющими на величину поверхностного сопротивления, являются: химический состав и структура материала (полярность или неполярность); наличие водорастворимых примесей в материале; наличие химически активных загрязнений влажной атмосферы; температура, чистота поверхности, относительная влажность воздуха и др. [79 - 81].

По утверждению В.В. Маслова [54] величина поверхностного сопротивления не может являться критерием влагостойкости диэлектрика на полимерной основе, обусловленной выше приведенными факторами влияния.

Снижение величины удельного объёмного сопротивления у электроизоляционных материалов в процессе увлажнения зависит в первую очередь от химического состава, и структуры материала и поэтому тесно связано с такой характеристикой материала, как влагопоглощение. На основании многочисленных испытаний влагостойкости различных видов диэлектриков (синтетических плёнок, эластомеров и стеклопластиков) установлено, что основным критерием влагостойкости диэлектрика следует считать величину удельного объёмного сопротивления [82 - 84].

### **2.3. Количественная оценка электропроводности электроизоляционных твёрдолокнистых материалов на базе древесины**

Объективная количественная оценка электропроводности древесины может быть получена путём их лабораторных испытаний. При определении электрических методов их проведения приходится учитывать, что древесина имеет биологическое происхождение и представляет собой комплекс природных полимеров, а в процессе переработки и службы в качестве несущих конструкций воздушных линий (ВЛ) подвергается воздействию самых разнообразных физических, климатических и других факторов. Можно утверждать, что количественная оценка электропроводности древесины должна базироваться не на строгом учёте (в математическом смысле этого слова) влияния каждого из многочисленных переменных факторов, а на измерении каких-либо чувствительных к этим факторам интегральных микропараметров структуры древесины. Действительно, учесть влияние каждого из факторов на степень изменения электропроводности древесины практически невозможно, тем более что многие из них действуют в разных направлениях по-разному. Определяющим является результирующее влияние переменных факторов.

Количественная оценка электропроводности древесины, как и любых материалов, особенно без их разрушения является сложной проблемой, стоящей на стыке многих наук. Поведение любого материала и его способность сопротивляться деформациям и разрушению под действием внешних факторов определяется его механическими макросвойствами: вязкостью, прочностью, упругостью. Эти макросвойства непосредственно связаны со структурой материала и действующими в ней молекулярными силами. Способность древесины (материала) сопротивляться внешним силам зависит не только от величины последних, но и от характера их приложения во времени [81, 85].

В настоящее время в электроматериаловедении не существует достаточно тесной связи между теоретическими и экспериментальными исследованиями, единой структурно-функциональной теории, связывающей дискретный (микроструктура) и непрерывный (макросвойства) аспекты в изучении даже классических электроизоляционных материалов, какими является натуральная древесина и полимеры. Из-за отсутствия единой теории, исследователи пользуются различными суждениями о влиянии того или иного структурного механизма на физико-механические свойства древесины как гетерогенной среды. При механическом использовании указанного подхода к гетерофазным древесным материалам (древесина, бумага, картон, целлюлоза, древесно-волокнистые и древесно-стружечные

плиты, пластики на основе бумаги и древесины и т.д.) правомочность теоретических допущений становится гораздо менее оправданной. Не случайно, что в последнее время у нас в стране и, особенно за рубежом намечающиеся пути создания теории гетерофазных материалов отличны от феноменологической теории вязкоупругости и сводятся к использованию аппарата так называемой статической геометрии, описывающей свойства гетерофазных материалов на макроуровне [81, 86].

Учитывая сложность затронутой проблемы, разнообразность материала, необходимого для анализа количественной оценки электропроводности древесины по литературным источникам различных научных направлений, автором предпринята попытка на базе широких экспериментальных исследований собрать достаточно представительный статистический материал для обоснования целей настоящей работы.

Оценка совокупности физико-механических и технологических процессов химической обработки электроизоляционной и электросетевой древесины с достаточной для практики точностью может быть сделана на основании экспериментальных данных о физических свойствах древесины, рассмотрения особенностей её строения и пороков [55, 67 - 72, 78].

Существующий нормативный документ ГОСТ 18408-73; (ГОСТ 6433.2-71) рекомендует для измерения электрического сопротивления древесины метод вольтметра-амперметра. Сущность метода заключается в измерении токов, проходящих через образец (при измерении удельного объёмного сопротивления  $\rho_V$ ) или по поверхности образца (при измерении удельного поверхностного сопротивления  $\rho_S$ ) при приложении к нему постоянного тока [55, 75, 76, 87].

Электропроводность - способность древесины проводить электрический ток, находится в обратной зависимости от её электрического сопротивления. Полное сопротивление образца древесины определяется как результирующая составляющая двух составляющих объёмного и поверхностного сопротивлений. Объёмное сопротивление  $R_V$  численно характеризует препятствие прохождению тока сквозь толщу образца, поверхностное  $R_S$  - по поверхности образца. Показателями электрического сопротивления служат: удельное объёмное сопротивление  $\rho_V$  и удельное поверхностное сопротивление  $\rho_S$ .

Удельное объёмное сопротивление  $\rho_V$  (Ом·см) вычисляется по формуле [55, 78]

$$\rho_V = R_V \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2}{4 \cdot h}, \quad (23)$$

где  $R_V$  - объёмное сопротивление, Ом;  $h$  - толщина образца, см;  $D_0=(d_1+d_2)/2$  - средний диаметр, см;  $d_1$  и  $d_2$ - диаметры электродов.

Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_S$  (Ом) вычисляется по формуле

$$\rho_S = R_S \cdot \pi \cdot \frac{D_0}{b}, \quad (24)$$

где  $R_S$  - поверхностное сопротивления, Ом;  $b$  - ширина зазора между электродами, см;  $D_0$  – средний диаметр, см.

Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_S$  обычно определяется для материалов, обладающих способностью адсорбировать на поверхности тонкую плёнку влаги. Эта способность наблюдается как у некоторых неорганических материалов, так и у некоторых видов органических твердых материалов. Величина  $\rho_S$  зависит также от степени чистоты поверхности материала и не является его физической характеристикой, но иногда бывает очень важна для оценки возможности практического использования тех или иных изолирующих материалов.

Сухая древесина характеризуется очень малой электропроводностью и её принято считать твердым диэлектриком. Абсолютно сухая древесина обладает удельным сопротивлением  $10^{13}$ - $10^{16}$  Ом·см и её относят к полярным диэлектрикам (табл. 1).

Таблица 1

**Удельное объемное сопротивление абсолютно сухой древесины [55]**

Порода	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	
	поперек волокон	вдоль волокон
Ель	$7.6 \cdot 10^{16}$	$3.8 \cdot 10^{16}$
Береза	$5.1 \cdot 10^{16}$	$2.3 \cdot 10^{16}$
Осина	$1.7 \cdot 10^{16}$	$8.8 \cdot 10^{15}$
Сосна	$2.3 \cdot 10^{15}$	$1.8 \cdot 10^{15}$

При наличии в древесине связанной воды её сопротивление резко уменьшается, и она становится по проводимости близкой к полупроводникам. При увлажнении её от абсолютно сухого состояния до предела насыщения клеточных стенок электропроводность возрастает в десятки миллионов раз, при дальнейшем повышении влажности она увеличивается лишь в сотни и даже десятки раз (табл. 2) [55, 66, 87].

При влажности выше предела насыщения клеточных стенок древесина может обладать ионной проводимостью. В переменном электромагнитном поле электрические свойства её определяются поляризационными процессами, происходящими при взаимодействии молекул составляющих её веществ с внешним полем. В этом

случае влажную древесину рассматривают как полярный диэлектрик [56, 67].

Таблица 2

**Удельное объёмное сопротивление (Ом·см)  
древесины при различной влажности [55]**

Порода	Влажность, %		
	0	7	20
Ель	$7.6 \cdot 10^{16}$	$1.0 \cdot 10^{12}$	$3.0 \cdot 10^8$
Береза	$5.1 \cdot 10^{16}$	$9.0 \cdot 10^{11}$	$1.0 \cdot 10^8$
Сосна	$2.3 \cdot 10^{15}$	$5.0 \cdot 10^{11}$	$3.0 \cdot 10^8$

Повышение температуры древесины приводит к уменьшению объёмного сопротивления, причем, чем меньше влажность, тем больше её влияние. Так, при увеличении температуры от 20 до 94°C сопротивление абсолютно сухой древесины снижается в  $10^6$  раз, а древесины с влажностью 22-24 % - всего в  $10^2$  раза. При отрицательных температурах величина объёмного сопротивления натуральной древесины выше, чем при положительных температурах.

Электропроводность древесины зависит от температуры и влажности среды, направления волокон (рис.1, 2) [55, 66], химических средств защиты (рис. 3) [88, 31, 25, 89 ÷ 92, 26] и породы (рис. 4-7) [70, 93, 94, 95]. Электропроводность древесины вдоль волокон является наибольшей, в радиальном направлении в 5 раз, в тангенциальном - в 3,8 раза меньше, чем вдоль волокон. Удельное объёмное сопротивление вдоль волокон образцов березы с влажностью 76% при 0°C составляет  $1,27 \cdot 10^7$  Ом·см, при охлаждении до -24°C увеличивается до  $1,02 \cdot 10^8$  Ом·см [70]. Среднее сопротивление образцов сосны вдоль волокон при 26.6°C и изменении влажности через каждый 1°C от 7 до 25% уменьшилась с 20900 до 0,52 МОм, а березы - с 87000 до 0,70 МОм [85].

Величина  $\rho_v$  комнатно - сухой древесины вдоль волокон значительно меньше (в 5-20 раз), чем поперек. Величина  $\rho_v$  образцов березы вдоль волокон (влажность 8,2 %) составляет  $4,27 \cdot 10^{10}$  Ом см, а  $\rho_s$  -  $4,07 \cdot 10^{11}$  Ом; поперек волокон (влажность 8%) –  $8,67 \cdot 10^{11}$  Ом см и  $2,87 \cdot 10^{12}$  Ом, соответственно [56]. Электропроводность характеризуется и через удельную объёмную проводимость (табл. 3.). Влияние влажности на удельную объёмную проводимость вдоль волокон приведено П.С. Серговским в виде графика (рис. 2) в работе [66].

Древесина может обладать абсолютной влажностью до 250%. Свободная влага обладает во много раз более высокими показателями электрических параметров по сравнению с древесиной. Взаимодействуя с ней в процессе адсорбции и капиллярной конденсации, связанная влага меняет свои электрические свойства и приво-

дит к изменению электрических свойств древесины. Свободная влага, заполняя полости клеток, также меняет характер взаимодействия древесины с электромагнитным полем (ЭМП), что ведёт к изменению её электрических свойств особенно на частотах, где вода обладает аномально высокими диэлектрическими параметрами.

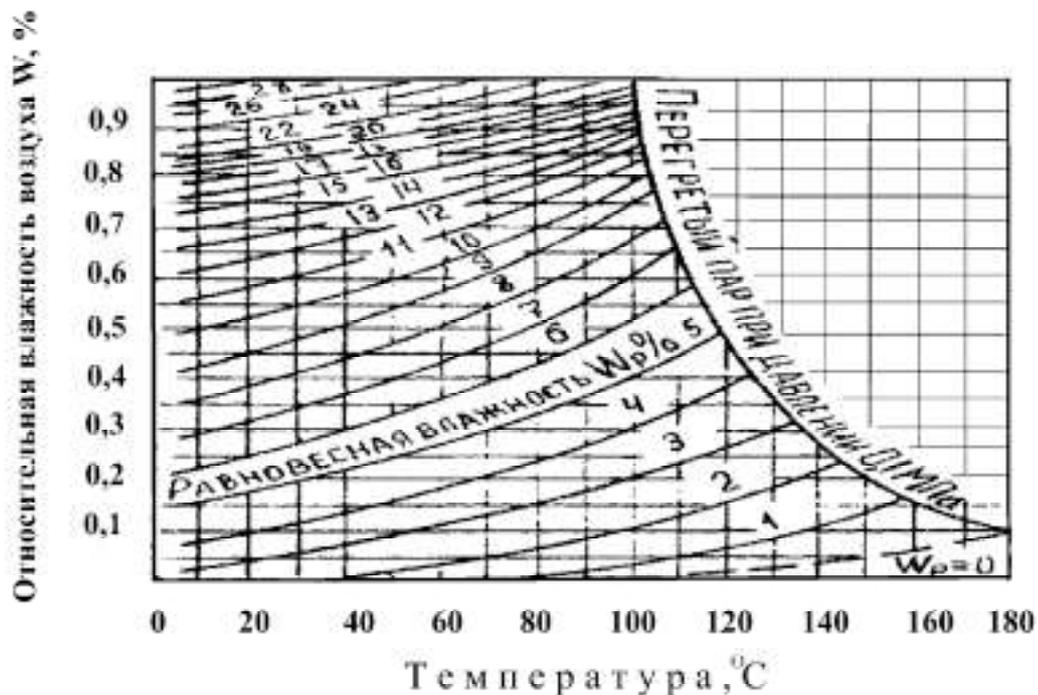


Рис. 1. Диаграмма равновесной влажности древесины [55]

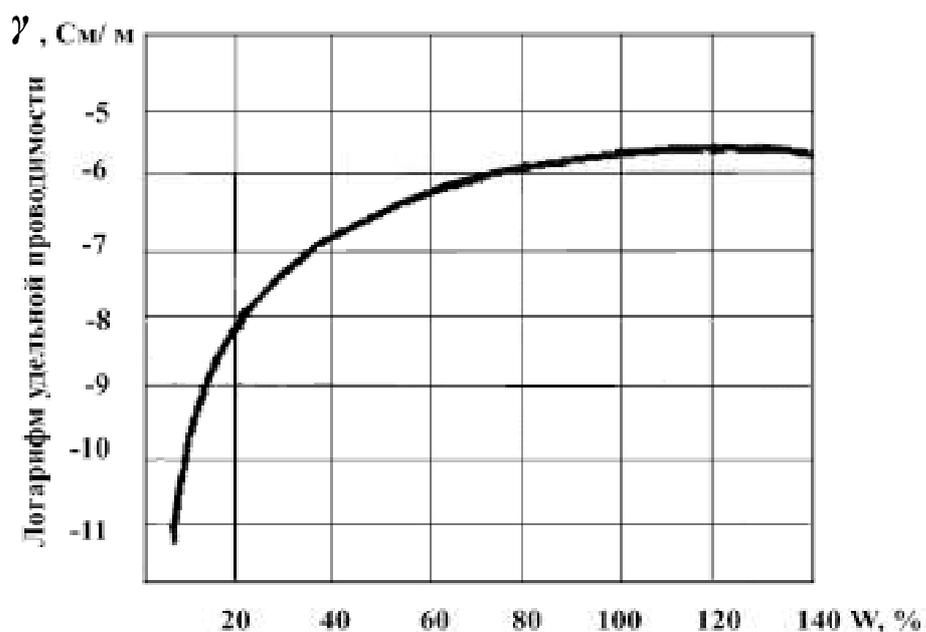


Рис. 2. Характер влияния влажности древесины на удельную объемную проводимость вдоль волокон [66]

Вода является компонентом, который существенно меняет и в большинстве случаев определяет электрические свойства древесины.

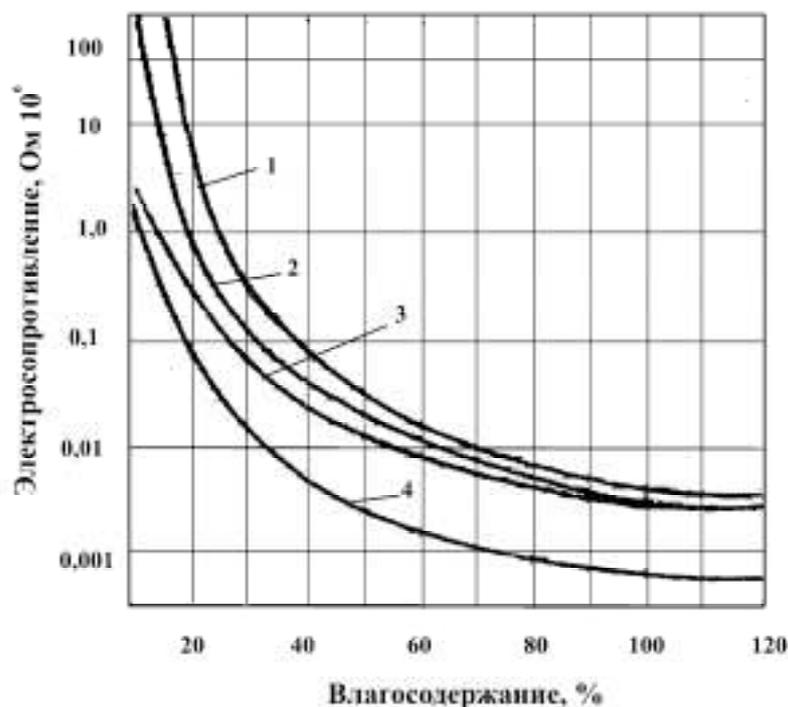


Рис. 3. Электрическое сопротивление древесины: 1 - пропитанной солью Болидена K-33; 2 – тоже S-25; 3 – непропитанной; 4 – пропитанной солью Болидена BIS [25]

Таблица 3

Удельная объёмная проводимость ( $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ) абсолютно сухой древесины при температуре  $20^\circ\text{C}$  [56]

Порода	Прохождение тока	
	поперек волокон в радиальном направлении	вдоль волокон
Ель	$1.3 \cdot 10^{-15}$	$2.7 \cdot 10^{-15}$
Береза	$1.9 \cdot 10^{-15}$	$4.3 \cdot 10^{-15}$
Осина	$6.0 \cdot 10^{-15}$	$1.2 \cdot 10^{-14}$
Сосна	$4.3 \cdot 10^{-14}$	$5.5 \cdot 10^{-14}$

А.П. Познаев (рис.4-7) [95] исследовал внутреннее сопротивление древесины различных пород в зависимости от влажности и температуры. Для этого использовал образцы толщиной  $15 \times 20 \times 40$  из сосны, бука, березы. Результаты исследований внутреннего сопротивления древесины вдоль и поперек волокон приведены в табл. 4.

В результате проведенных исследований была установлена зависимость сопротивления древесины от температуры  $t$  и влажности  $W_{\text{среды}}$  в виде функции

$$R_x = C \cdot W^{-k} \cdot 10^{-bt}, \quad (25)$$

где  $C$ ,  $k$  и  $b$  - положительные постоянные коэффициенты, зависящие от породы древесины и условия измерения, а

$$W = W_n + \alpha \cdot (20 - t), \quad (26)$$

где  $W_n$  - влажность %, зарегистрированная прибором;  $\alpha$  - коэффициент 0,1.

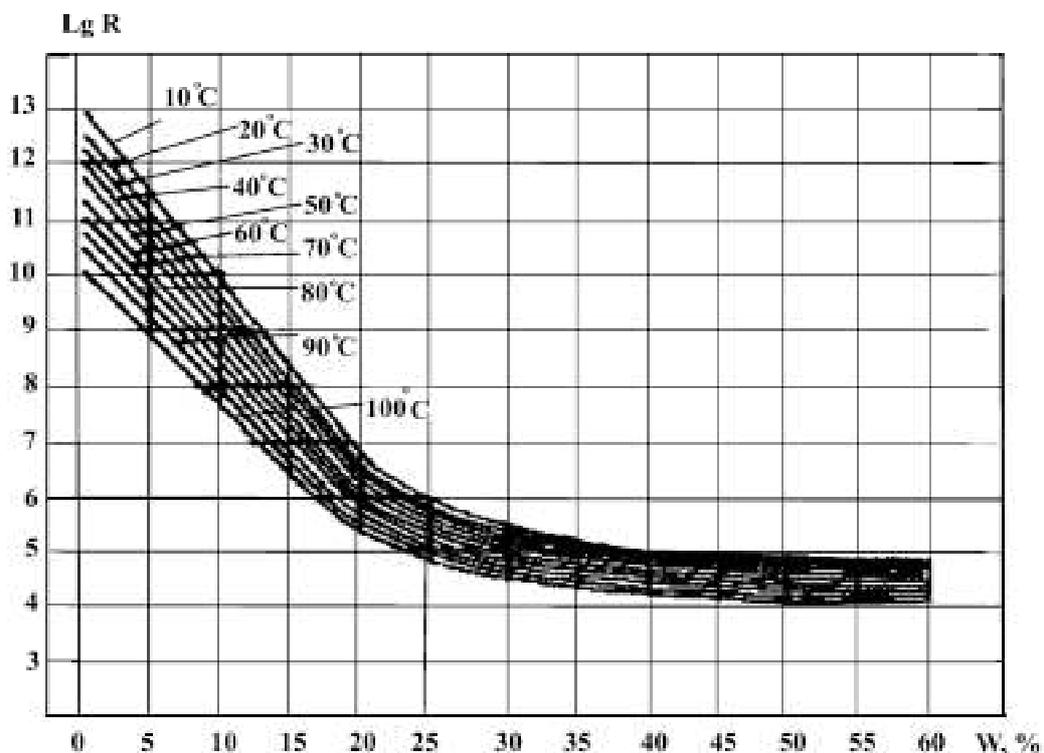


Рис. 4. Зависимость внутреннего сопротивления древесины сосны  $R$  от влажности при постоянной температуре [95]

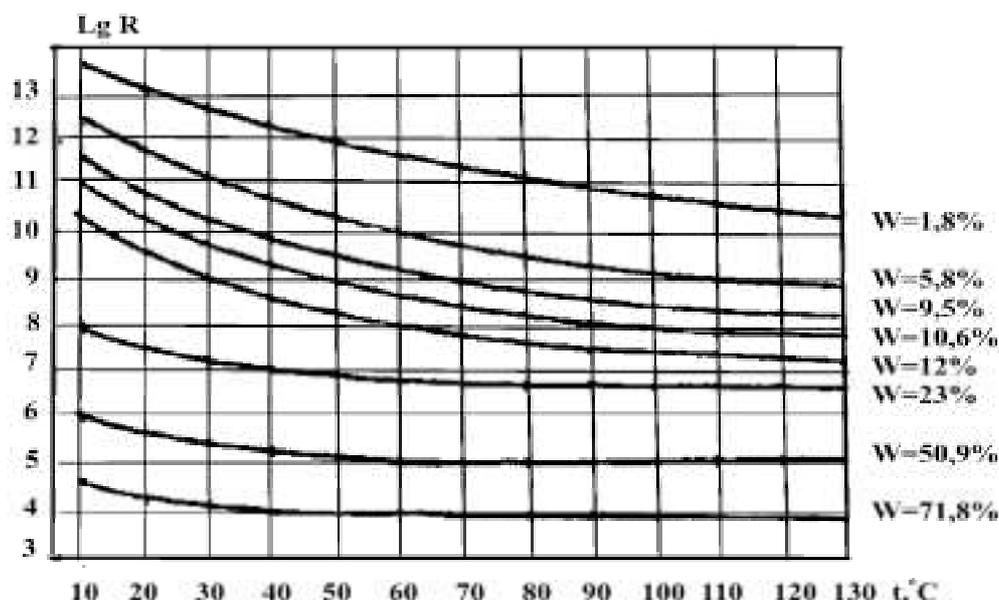
По утверждению автора [67] физические закономерности электрических и диэлектрических свойств натуральной и пропитанной древесины теоретически слабо изучены и могут дать только качественную оценку. Сложность взаимодействия связанной воды с древесиной, а также сложность взаимодействия возникающей структуры древесина-вода с электромагнитным полем не позволяет применить аналитические методы для определения электрических параметров древесины с влажностью до предела насыщения клеточных стенок (30%). Определение их производится экспериментально.

В настоящее время отсутствует математическая теория проводимости древесины. Поэтому решение этой задачи, исходя из самых общих положений термодинамики и физики, описываемых соответствующими уравнениями, представляет значительный интерес. Безусловно, в полном виде задача проводимости древесины не может быть решена, но по ходу её решения в отдельных частях она сужается до решения некоторых, более частных задач, относящихся к узловым моментам влагопроводности капиллярно-пористой среды.

Таблица 4

## Удельное объемное и поверхностное сопротивление [95]

Порода	Направление приложения по отношению к волокнам древесины	Воздушно-сухие образцы		
		Удельное объемное сопротивление, Ом·см	Удельное поверхностное сопротивление Ом	Содержание влаги в образцах, %
Бук сер.	поперек волокон	$1.4 \cdot 10^{10}$	$7.9 \cdot 10^{10}$	8.3
Бук сер.	вдоль волокон	$1.7 \cdot 10^9$	$9.4 \cdot 10^{10}$	9.2
Бук бел.	поперек волокон	$2.0 \cdot 10^{11}$	$6.6 \cdot 10^{11}$	7.6
Береза	поперек волокон	$8.6 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{12}$	7.9
Береза	вдоль волокон	$4.2 \cdot 10^{10}$	$4.0 \cdot 10^{11}$	8.2
Ольха	поперек волокон	$1.6 \cdot 10^{12}$	$4.7 \cdot 10^{12}$	7.5
Дуб	поперек волокон	$1.0 \cdot 10^{10}$	$3.9 \cdot 10^{11}$	-

Рис. 5. Зависимость внутреннего сопротивления древесины сосны  $R$  от температуры при постоянной влажности [95]

Отправными пунктами для постановок такой задачи и ее решения могут служить известные работы А.В. Лыкова и других авторов [53, 54, 55, 96 ÷ 98] по проблеме тепло - и массообмена в пористых средах: проницаемости и проводимости древесины, взаимодействия древесины с водой и ЭМП и др.

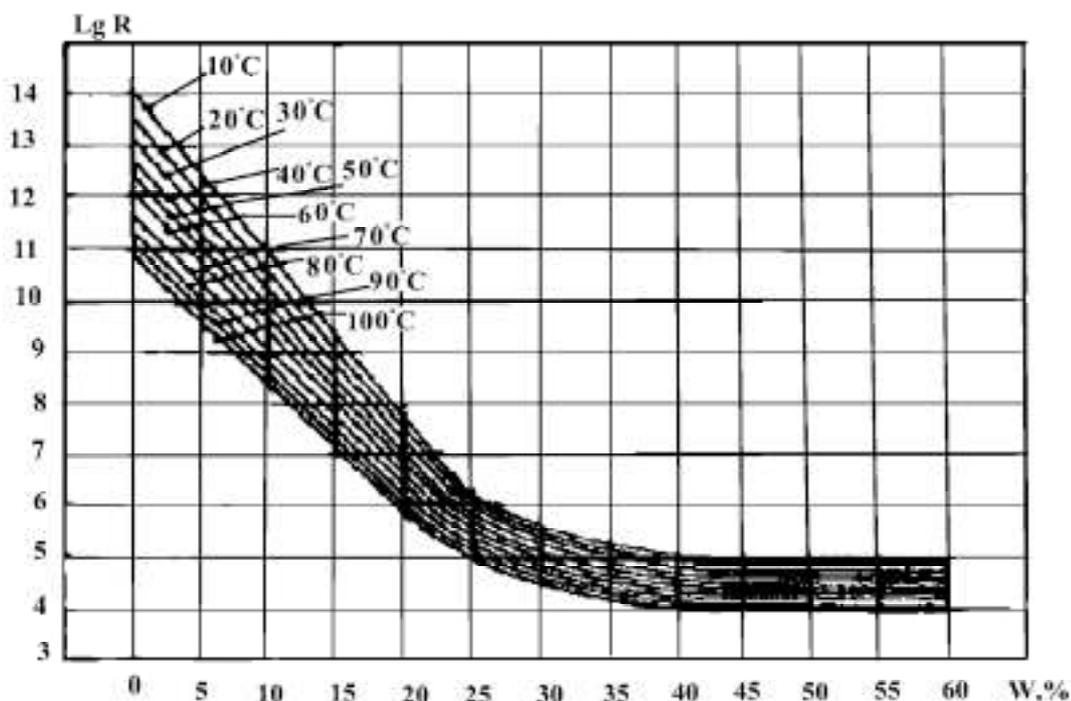


Рис. 6. Зависимость внутреннего сопротивления древесины березы  $R$  от влажности при постоянной температуре [95]

Математическое исследование проводимости древесины наталкивается на исключительно большие трудности вследствие сложного переплетения различного рода биолого-анатомических, физических, химических и других факторов. В самой общей постановке эта задача с энергетической и кинетической сторон, без учёта гидродинамических явлений, связана с процессами тепло - и массообмена, сопровождающимися фазовыми и химическими превращениями. С теоретической стороны явление молекулярного переноса энергии и вещества связаны с молекулярной физикой, термодинамикой необратимых процессов и математической теорией теплопроводности.

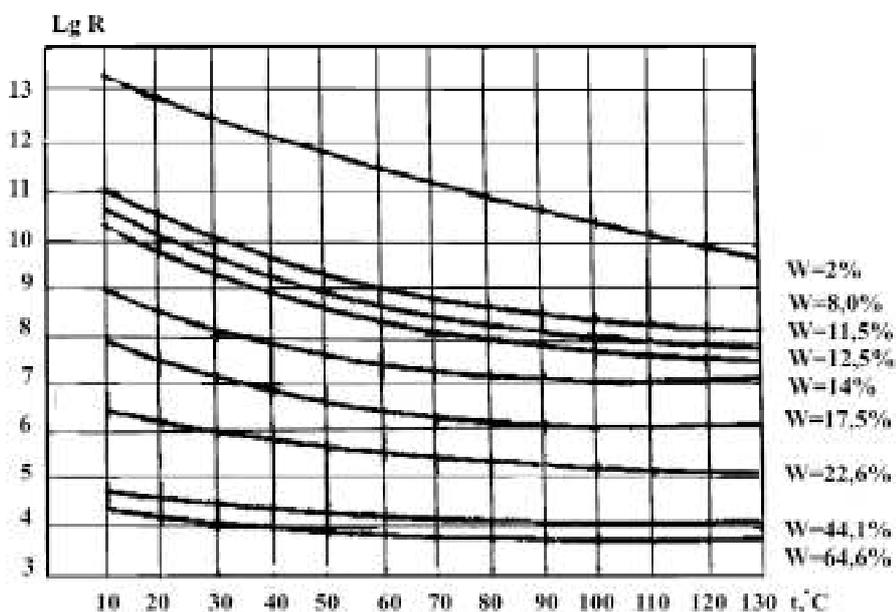
Полная система дифференциальных уравнений, описывающих процесс тепло и массообмена (вагопроводность) в условиях отсутствия поля механических сил имеет вид

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot V + a \cdot \delta \cdot \nabla^2 \cdot t + E \cdot \frac{\partial V}{\partial \tau}, \quad (27)$$

$$C \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \cdot \nabla^2 \cdot t + E \cdot \rho \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} - \sum_{i=1}^2 q_i \cdot C_i \cdot \nabla \cdot t, \quad (28)$$

где  $a$  - коэффициент теплопроводности;  $\delta$  - термоградиентный коэффициент;  $\nabla$  - удельное содержание массы вещества;  $t$  - температура;  $E$  - критерий фазового превращения;  $C$  - концентрация диффузирующего вещества;  $\tau$  - время;  $\gamma_0$  - относительная плотность капиллярно-пористого тела;  $\lambda$  - коэффициент

теплопроводности;  $\rho$ - удельная теплота парообразования;  $q_i$  - удельный поток вещества в соответствующей форме;  $C_i$ - изотермическая удельная массоемкость связанного вещества фазы  $i$ .



**Рис. 7. Зависимость внутреннего сопротивления древесины березы  $R$  от температуры при постоянной влажности [95]**

Эти выражения - обобщённые уравнения типа теплопроводности с наличием внешних источников (стоков) и могут быть решены при заданных граничных и начальных условиях. Однако инженерный смысл решения эти уравнения будут иметь для практики только тогда, когда будут известны значения  $\alpha$  для различных древесных пород. Значения величин  $\alpha$  могут послужить своеобразными ориентирами построения молекулярно-кинетической теории проводимости древесины [55].

## 2.4. Анализ электропроводности пропитанной древесины

Электропроводность пропитанной защитными средствами древесины так же, как и не пропитанной значительно колеблется. Древесина, пропитанная водорастворимыми защитными средствами, чаще имеет повышенную электропроводность, причем тем выше, чем больше содержится в ней соли. Пропитанный маслянистыми защитными средствами образец, наоборот, имеет пониженное значение электропроводности [81, 25, 94, 95].

Исследованиями установлено, что электрическое сопротивление древесины, пропитанной креозотовым маслом и препаратом ХМ-11 снижается при увеличении температуры и относительной влажности воздуха. Причём влажность оказывает более сильное

влияние на изменение электрического сопротивления древесины, чем температура среды.

Свойства древесины улучшаются при её пропитке парафином, различными смолами и химическими препаратами. Однако путём пропитки невозможно уничтожить гигроскопичность древесины. Большое поглощение влаги у материалов на целлюлозной основе, обусловлено наличием гидроксильных групп ОН, происходит благодаря тому, что волокна имеют внутренние поверхности, на которых происходит полимолекулярная адсорбция воды, межмолекулярные и внутримолекулярные пространства, микроскопические поры и трещины, капилляры [56, 64, 65, 71, 72].

Влияние пропиточных защитных средств на физико-механические свойства древесины конструкций, испытывающих при эксплуатации значительные нагрузки, рассмотрено в работах [31, 32, 88, 89, 90, 114-117].

Исчерпывающие данные об электрических свойствах древесины по утверждению П.С. Серговского [66] в связи с очень сложным и многообразным влиянием на них самых различных физических факторов пока отсутствуют, и эта проблема ещё нуждается в дополнительных исследованиях.

Объективная оценка физических свойств древесины может быть получена путём её испытаний. Для каждого вида испытаний и при разработке методов их проведения приходится учитывать, что деревянные изоляционные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию окружающей среды. Пожалуй, ни один из материалов не требует такого многообразия методов испытаний, как древесина.

М.М. Михайловым [53], В.В. Масловым [54] и другими [60, 63, 70-74, 77, 97] на базе обширных исследований были рассмотрены наблюдавшиеся зависимости изменений величин удельного объёмного сопротивления от продолжительности увлажнения представителей практически всей широкой гаммы электроизоляционных материалов: лаков, компаундов, электроизоляционных плёнок и композиционных материалов на основе этих плёнок, пластмасс, включая слоистые пластики, стеклолакотканей, эластомеров, слюдяных материалов, и был определен критерий влагостойкости перечисленных диэлектриков - удельное объёмное сопротивление. Величина удельного объёмного сопротивления у электроизоляционных материалов в процессе увлажнения снижается за счет влагопоглощения. В то же время В.В. Маслов отмечает, что на практике наблюдается резкое снижение общего сопротивления изоляции изделия из-за конденсации влаги на поверхности изделия и, следовательно, низкого значения поверхностного сопротивления в самом слабом месте. Поэтому до сих пор не существует единых мнений по ряду вопросов, связанных с увлажнением изоляции, к которым относятся:

объяснение форм и видов связи влаги в диэлектрике; физическая трактовка причин возможной разницы в степени увлажнения диэлектрика в условиях повышенной влажности и в воде; влияния абсолютной влажности на скорость и степень увлажнения и рассмотрения других факторов, влияющих на скорость увлажнения электрической изоляции.

Анализируя обобщенные данные испытаний электроизоляционных материалов [53, 54], с учётом утверждения В.В. Маслова, в качестве критерия влагостойкости принимается удельное объёмное сопротивление. Однако следует отметить, что это утверждение справедливо только для определенной части органических материалов, куда не входят капиллярно-пористые коллоидные тела. В число тел этой группы входит древесина, которая, как известно, тоже органический, полимерный материал природного происхождения. Органическая часть древесины – целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин являются полярными диэлектриками, которые вносят соответствующий их свойствам вклад в диэлектрические параметры древесного вещества. Макромолекулы целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина обладают в электрическом поле ионной проводимостью, которая возрастает из-за содержания в клеточных стенках проводящих примесей. Абсолютно сухая древесина (высушенная при 100°С) состоит в основном из органических веществ на 99% (общей массы), на долю неорганической приходится 0,2-1,7% [81, 86, 100, 101].

Существует ещё одна сторона этой проблемы. Капиллярность абсолютно сухой клеточной стенки древесины ничтожно мала; её внутренняя удельная поверхность не превышает 1-2 мм<sup>2</sup>/г древесины. При увлажнении клеточная стенка древесины, включая её аморфные области, переходит в коллоидное состояние с развитой поверхностью раздела фаз между древесной матрицей и водой (высокодисперсной микрогетерогенной системой). Клеточные стенки абсолютно сухой древесины с первыми порциями сорбированной воды и при дальнейшем увлажнении их увеличиваются в размерах, приобретая максимальную величину при влажности вблизи предела насыщения клеточных стенок [100]. Таким образом, наиболее сильные деформации (изменение размеров от набухания) древесины вызывает адсорбционная влага. При этом происходит отделение наружного поверхностного слоя древесины деревянных конструкций и изделий от внутренних областей. Следовательно, удельное объёмное сопротивление внутренних областей сохраняет постоянство по величине, в то время как удельное поверхностное сопротивление по мере увлажнения уменьшается, вызывая изменение эквивалентного сопротивления изделия из древесины. С этой точки зрения критерий - удельное поверхностное сопротивление, для органической электрической изоляции, нельзя считать универсальным.

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по исследованию влияния увлажнения на свойства электрической изоляции. Оценка электрических свойств натуральной древесины приводится в многочисленных справочных и других изданиях. Однако, как правило, в них практически редко: указываются условия испытания, при которых они получены; требования к образцам и электродным установкам; скоростным характеристикам, изменения режимов испытаний и др. Вопросам, связанным с электрофизическими свойствами пропитанной древесины в технической и научной литературе, кроме механических, уделено скудное внимание практиков и учёных. Крупной и малоизученной остаётся проблема комплексных экспериментальных исследований электрических свойств натуральной и пропитанной древесины в различных температурно-влажностных условиях среды, вида и концентрации химической пропитки и др.

Не существует достаточно тесной связи между теоретическими и экспериментальными исследованиями, позволяющей аргументированно прогнозировать заданные электрические свойства древесины, и изделий, несущих конструкций ЛЭП и ВЛ на её основе.

Исключением в этом вопросе является работа М.М. Михайлова по исследованию свойств пропитанного картона, позволившая опровергнуть общепринятую теорию Эвершеда о гигроскопичности волокнистых материалов и дать совершенное новое толкование механизма гигроскопичности [54]. Теория увлажнения органических электроизоляционных материалов построена, в основном, на влажностных характеристиках (константах) этих материалов. Эта теория в совокупности с теорией поверхностных явлений [63, 65] способствовала внедрению современных научных представлений о влагозащитных свойствах органических электроизоляционных материалов в заводскую практику по созданию усовершенствованных систем влагозащиты для электро- и радиотехнических изделий. Для решения поставленной задачи необходимо воспользоваться влажностными константами М.М. Михайлова [53], методом равновесного влагопоглощения Д. Эндрюса и А. Джонсона [58] с учётом поверхностных явлений (у С.А. Яманова [63]) при разработке инженерного метода расчета электропроводности натуральной и пропитанной древесины.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАТУРАЛЬНОЙ И ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

#### 3.1. Методика экспериментальных исследований гигроскопичности и электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины

Целевая процедура в постановке экспериментальных исследований гигроскопичности и электрических характеристик натуральной и пропитанной древесины включает в себя следующие этапы.

**1. Изготовление и подготовка образцов древесины** к испытаниям соответствовала ГОСТ 16483.0-78 "Древесина. Методы испытаний. Общие требования". Кратко отметим: отбор образцов из натуральной и пропитанной защитными химическими препаратами древесины проводится в две стадии. Измерение размеров готовых образцов производится с погрешностью не более  $\pm 0,1$  мм. Чистота поверхности образцов  $R_{Zmax}$  не более 100мкм. Погрешность измерения толщины  $L$  образцов не превышала  $\pm(1\%L+0,002\text{мм})$ . Разброс по толщине образца не превышал 2%. Неперпендикулярность боковой поверхности торцевым не превышала 0,2мм. Контроль размеров образцов древесины производился специальным шаблоном, который использовался также в качестве калибра. После окончательного кондиционирования образцов по влажности на их боковых поверхностях появляется ворсистость. Поэтому образцы перед измерениями калибруют, одевая на внутреннюю, а затем продавливая через наружную часть шаблона. Образец должен плотно, с натягом, садиться на внутреннюю часть шаблона и с натягом входить в наружную часть. Только после этого образец считается готовым для испытаний.

При теоретическом рассмотрении свойств древесины исходным понятием является элементарный объем, который должен заключать в себе столько структурных единиц, чтобы его можно было с достаточной точностью считать однородным; он должен быть настолько мал, чтобы можно было пренебречь изменением физических полей на его протяжении, т.е. рассматривать их как однородные. Средний объем образцов составил  $28,125 \pm 0,2\text{см}^3$ .

На поверхности образцов не было видимых невооруженным глазом трещин, вмятин, сколов, заусенцев, загрязнений, царапин; плоскости образцов были плоскопараллельными.

Форма образцов квадратная, размером 75×75×5 мм. Перед измерением образцы выдерживались в комнатных условиях (25-30°C, влажности 55-65%) не менее двух суток. Количество образцов древесины при определении каждого параметра бралось равным 15 шт., а всего было использовано 450 шт.

Для измерения гигроскопичности и электрического сопротивления пропитанной древесины опытные образцы обрабатывались по следующей технологии. Влажность образцов перед пропиткой составляла  $10 \pm 0,5\%$ . Пропиточные составы готовились в концентрациях, составляющих 100, 75, и 50% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами. В качестве растворителя водорастворимых препаратов использовали водопроводную воду.

Образцы пропитывались в лабораторной автоклавной установке согласно ГОСТ 16712-71 (с изменениями). С момента установления остаточного давления 4мм рт. ст. вакуумирование продолжали 10 мин, после чего пропитанную буксу наполняли раствором защитного средства. Образцы выдерживали в растворе 40 мин.

По результатам пропитки определяли поглощение сухой соли  $P_{с.с}$  в каждом образце по формуле

$$P_{с.с} = \frac{P_{p-ра} \cdot C \cdot 100}{V}, \quad \text{кг/м}^3 \quad (29)$$

где  $P_{p-ра}$  - поглощение раствора образцом древесины, г;  $C$  - концентрация раствора, доли;  $V$  - объём образца древесины, см<sup>3</sup>.

Для химической пропитки образцов древесины использовались антисептики, консерванты и антипирены, представленные в табл. 5, свойства, которых приведены в работах [25-26, 34-36, 64-65, 68, 88-89, 115-118].

Таблица 5

**Защитные химические препараты**

№ п/п	Название химического препарата защиты	Химическое представление препарата	ГОСТ или ТУ пропитки
Антисептики и консерванты			
1	Фтористый натрий, НФ	NaF	ТУ 113-08-586-80
2	Хлористый цинк, ХЦ	ZnCl <sub>2</sub>	ГОСТ 7345-78
3	Фтористый аммоний, ФА	NH <sub>4</sub> F	ГОСТ 4518-75
4	Кремнефтористый аммоний, КФА	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	ОСТ 6-08-2-75
5	Нафтенат меди, НМ	Cu(C <sub>10</sub> H <sub>17</sub> OO <sub>2</sub> )	ГОСТ 9549-80
6	ХМ-11		ГОСТ 23787.8-80
7	ПХФН	Пентахлорфенолят натрия	ТУ 6-04-6-80
8	ФБС - 211	-	ОСТ 13-135-82
9	БС-13	-	ОСТ 13-135-82
10	Креозотовое масло, КМ		ГОСТ 2770-74
11	Галиах	-	-
12	К-12	-	ТУ 113-08-2-111-91
13	МБ	-	ТУ 204-06-134-93

14	БК	-	ТУ 204-06-1131-93
15	ХМФС	-	ГОСТ 28815
16	ПХДС-Т	-	ТУ- 2382-111-00210045-98
Антипирены			
17	ФБС - 255	-	ОСТ 13-135-82
18	ДМ-11	-	ОП 24-111-272-94
19	Сульфат аммония, СА	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	ГОСТ 9097-82
20	Натуральная древесина	-	-

**2. Выбор метода измерений электрических величин древесины.** При выборе метода измерений сопротивления  $R$  древесины её следует рассматривать как многокомпонентный анизотропный материал, который обладает влажностью в диапазоне от 0 до 250% и меняет свои размеры при увлажнении или высыхании.

Исследованиями Н.А. Леонтьева [102] и Б. С. Чудинова [103, 104] установлено, что влажность и температура, интенсивность их изменения во времени оказывают существенное влияние на механические, теплофизические и другие свойства древесины. Механические свойства, разбухание, усушка и электропроводность древесины в большой степени зависят от содержания связанной влаги. Поэтому эта информация учитывалась при планировании эксперимента.

Большой коэффициент изменчивости свойств древесины усложняет проведение измерений и вносит большие случайные погрешности. Выбор метода измерений сопротивления  $R$  основан на использовании общих методик соответствующих испытаний твёрдых диэлектриков. Измерение электрического сопротивления древесины проводили методом вольтметра-амперметра, рекомендуемым ГОСТом 18408 - 73 (6433. 2-71) при условии учёта специфических свойств древесины.

Принципиальная схема испытательной установки и электродное устройство для измерения электрического сопротивления древесины показаны на рис. 8. По известному значению напряжения  $U$ , измеренного с помощью вольтметра, и величине тока  $I$ , определенно по гальванометру определяли  $R_V$  и  $R_S$ .

Величину удельного объёмного сопротивления  $\rho_V$  и удельного поверхностного сопротивления  $\rho_S$  определяли по формулам (23-24). При измерении сопротивления  $R$  в качестве электрометрических приборов использовались: вольтметр-электрометр цифровой В7-30 и аналоговый прибор У5-7, которые обладают чувствительностью 1 мВ при входном сопротивлении  $10^{12}$  Ом, так что с их помощью измерялось сопротивление до  $10^{14}$  Ом. Источником постоянного напряжения, обеспечивающим измерение  $R$  в комплекте с В7-30,

служил выпрямитель стабилизированный типа ВС-27. На образец подавалось напряжение 100 В.

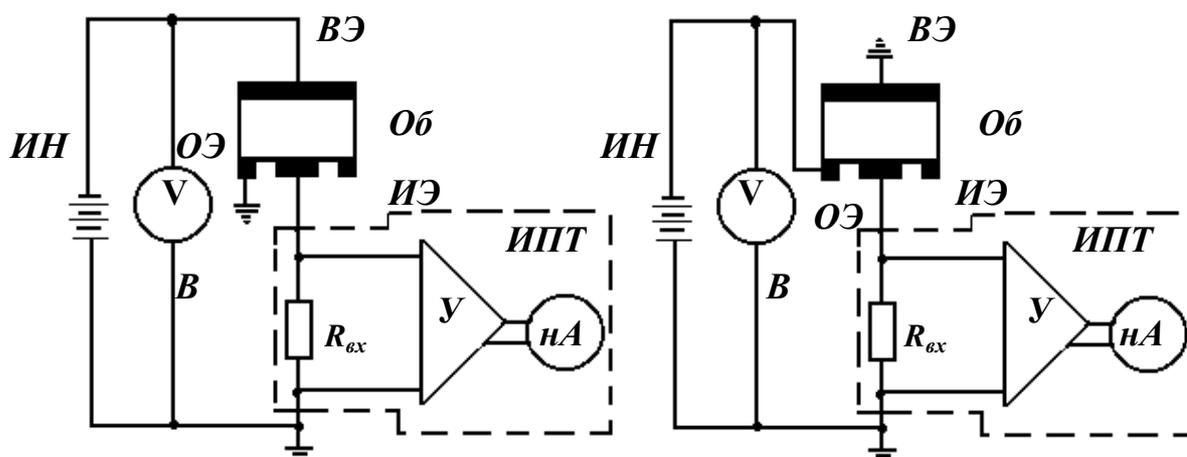


Рис. 8. Схема установки для определения  $R_V$  (а), и  $R_S$  (б) по трехэлектродной схеме: ИН - источник постоянного напряжения; В - вольтметр; ИПТ - измеритель постоянного тока;  $R_{ВХ}$  - входное сопротивление ИПТ; У - усилитель; ИА - индикатор; Об - образец с электродами (ИЭ - измерительный, ВЭ - высоковольтный, ОЭ - охранный)

В отдельных случаях измерение  $R$  проводилось тераомметром типа Е6-13А. При этом использовались показания правой части шкалы (примерно до середины), иначе при больших значениях  $R$  погрешность превысит  $\pm 10\%$ . Погрешность измерения  $R$  составила  $\pm 10-12\%$ .

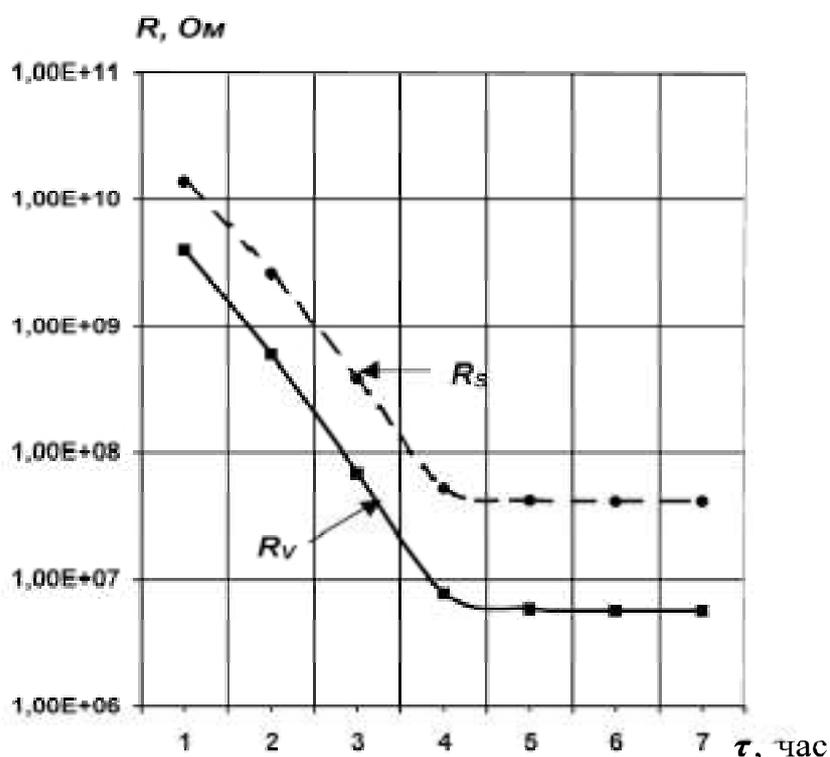
Для измерения  $R$  использовали специальный электрод, показанный на фото П.3.1. Создание надежного контакта с образцом обеспечивалось грузом, который создавал давление не менее  $10^4$  Па.

Перед испытанием электроды на образце были замкнуты не менее 1 мин до подачи испытательного напряжения. Время выдержки образца под напряжением производилось в течение 60 с после его приложения.

Образцы древесины испытывались в климатермокамерах (фирмы «ELKA», ГДР; «Palatinous G» и «Табай МИНИ-САБЗЕРО», Япония) в двух температурно-влажностных режимах. Температура в камере изменялась в диапазоне  $-(35 \dots +95)^\circ\text{C}$  через каждые  $10^\circ\text{C}$ . Погрешность измерения по температуре составила  $\pm(1\dots 3)^\circ\text{C}$ . Относительная влажность в камере изменялась в процессе эксперимента в пределах  $(10 \dots 100)\%$  через каждые 10%.

Погрешность измерения по влажности составила  $\pm 3\%$ . Максимальное значение систематической погрешности измерения  $R$ , определяемое как среднее квадратичное из перечисленных выше погрешностей, составила  $\pm(3,5 \dots 4,1)\%$ .

Случайные погрешности, вызываемые колебаниями влажности, изменчивостью в строении формы образцов и воздействием других внешних факторов, имеют значение, превышающее систематические погрешности. Поэтому в качестве важной меры исключения случайных погрешностей было решено определить время выдержки образцов в камере испытания, в течение которого адсорбционные процессы в древесине замедлялись настолько, чтобы измерение  $R$  по показаниям приборов осталось постоянным. На рис. 9 показан характер изменения  $R$  во времени при постоянной температуре  $40^{\circ}\text{C}$  и влажности  $60\%$ .



**Рис. 9. Характер изменения сопротивления образцов древесины сосны от времени испытания их в климактермокамере**

Из анализа полученных кривых можно констатировать, что замедление изменения сопротивлений образцов непосредственно связано с замедлением адсорбционного процесса в древесине, т.е. связано с наступлением процесса насыщения сухой древесины влагой из среды, которое для выбранных условий наступает через 5 часов испытаний образцов в камере. Причиной этого процесса по данным [105] является то, что в момент соприкосновения абсолютно сухой древесины образцов с влажным воздухом начинается адсорбция молекул воды всеми открытыми поверхностями. Вскоре открытая поверхность оказывается покрытой пленочной водой из нескольких слоев молекул воды. Эта вода сорбированная древесиной в капиллярах, радиус которых меньше  $10^{-5}$  см, называется связан-

ной (адсорбированной) или гигроскопической водой. На основании этих данных мы пришли к выводу, что сопротивление древесины целесообразно измерять после того, как закончатся адсорбционные процессы на границе раздела фаз, сложные процессы взаимодействия воды с поверхностью адсорбента, при которых изменяются не только свойства самой воды в соответствии с природой и структурой тела, но также природа и структура поверхностного слоя тела, что уже не может влиять на характер и энергию связи между ними [105, 106], т. е. через 6 часов их выдержки при фиксируемых значениях температуры и влажности в испытательной камере.

Таким образом, с учетом сказанного ниже приведены результаты действительных значений сопротивлений древесины - изоляционного материала, используемого при строительстве электрических сетей.

### **3. Методика исследования гигроскопичности древесины.**

Известно, что электропроводность зависит от капиллярной влаги в древесине, последняя зависит от объема пустот и объемного веса древесины, чем меньше объемный вес древесины, и чем больше в ней пустот, тем больше влаги она сможет вместить [54].

Поэтому образцы перед испытанием, взвешивались на электронных весах типа ВЛР-200g-M ГОСТ 24104-85, и исследовалась динамика проникновения влаги в древесину при различном ее состоянии [70].

При испытании образцов различной пропитки и степени концентрации 100, 75 и 50% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами рабочих растворов, на гигроскопичность (ГОСТ 16483.19-72), эксперимент производился в климатермокамере при постоянной температуре 20 и 40°C с изменением относительной влажности в диапазоне 20-95%.

Вес образцов определялся методом взвешивания с точностью до 0.0001г. Время выдержки образцов в камере при фиксированных температуре и влажности среды составил не менее 6 часов.

Чтобы не внести погрешность в результаты испытания в момент переноса образцов из климатермокамеры на весы, образцы были помещены в целлофановые пакетики. Они предохраняли образцы от окружающей среды. Всего было произведено более 10 измерений с каждым образцом.

**4. Статистический анализ результатов испытаний древесины.** Показатель  $X$ , характеризующий любое физико-механическое свойство древесины, отличается большой изменчивостью. Результаты его измерений при повторении испытаний оказываются различными. Поэтому исчерпывающее представление о данном показателе можно было бы получить по результатам испытаний бесконечно большого числа образцов. Все множество полученных таким образом значений данного показателя называется генеральной со-

вокупностью. Эту статистическую совокупность характеризует ряд параметров. Генеральное среднее  $\bar{X}$ , т. е. среднее арифметическое по всему множеству значений, есть основной параметр совокупности. Генеральная дисперсия  $\delta^2$  и генеральное среднее квадратичное отклонение  $\delta$  характеризуют меры рассеяния единичных результатов наблюдений, т. е. абсолютную величину их разброса вокруг среднего значения. Генеральный вариационный коэффициент  $V$  выражает в относительных величинах изменчивость единичных результатов по сравнению со средним значением. Экспериментальным путем точно определить указанные параметры нельзя; можно лишь приближенно оценить их, используя результаты наблюдений, составляющих лишь часть генеральной совокупности - выборку. Чем больше объем выборки, т. е. больше число объектов  $n$ , тем точнее оценки, поскольку

$$\bar{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{X}; \quad (30)$$

$$\delta^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} S^2, \quad (31)$$

где  $\bar{X}$  - выборочное среднее;  $S^2$  - выборочная дисперсия.

Для выборочной совокупности, состоящей из результатов испытаний однородных, т. е. не подлежащих дальнейшему делению, элементарных объектов определяли статистические параметры по следующим формулам [107]:

выборочное среднее

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (32)$$

где  $X_i$  - результат единичного испытания;

выборочная дисперсия

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n} \right], \quad (33)$$

среднее квадратичное отклонение

$$S = \sqrt{S^2}, \quad (34)$$

выборочный вариационный коэффициент, %

$$V = 100 \cdot S / \bar{X} \quad (35)$$

дисперсия выборочного среднего

$$S_{\bar{X}}^2 = S^2 / n, \quad (36)$$

среднее квадратичное отклонение выборочного среднего

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{S_{\bar{X}}^2} = S / \sqrt{n}, \quad (37)$$

относительная погрешность определения генерального среднего с доверительной вероятностью  $\alpha$

$$d_{\alpha} = \tau_{\alpha} \cdot S_{\bar{X}} / \bar{X} = \tau_{\alpha} \cdot V / \sqrt{n}. \quad (38)$$

Тогда доверительный интервал генерального среднего определяется соотношением

$$\bar{X} - \tau_{\alpha} \cdot S_{\bar{X}} \leq \bar{X} \leq \bar{X} + \tau_{\alpha} \cdot S_{\bar{X}}. \quad (39)$$

Входящий в уравнение (38) и (39) квантиль распределения Стьюдента  $\tau_{\alpha}$  используют при ограниченном объеме выборки. В данном случае он характеризует отклонение значения случайной величины  $\bar{X}$  отнесенное к среднему квадратичному отклонению  $S_{\bar{X}}$ . Значение коэффициента  $\tau_{\alpha}$  существенно зависит от объема выборки  $n$  (при  $n \leq 31$ ) и требуемой доверительной вероятности  $\alpha$  его можно найти в таблице приложения к ГОСТ 16483. 0-78 или в других изданиях.

Количество объектов испытаний (образцов) определяли по формуле

$$n = \tau_{\alpha}^2 \cdot V^2 / d_{\alpha}^2. \quad (40)$$

В древесиноведении принято оценивать генеральное среднее при доверительной вероятности 0,95 с относительной погрешностью  $d_{\alpha} = 5\%$ , если коэффициент вариации  $\vartheta = 20\%$ , и с погрешностью  $d_{\alpha} = 10\%$ , если  $\vartheta > 20\%$ . Для предварительного определения минимального количества образцов принимали ориентировочные значения коэффициента вариации, приведенного в таблицах ССД "Древесина. Показатели физико-механических свойств малых образцов без пороков". Квантиль Стьюдента находили, задавшись предполагаемым значением  $n$ . Если рассчитанное по формуле (40) значение  $n$  окажется больше или меньше предполагаемого, расчет повторяли до тех пор, пока различие между ними будет не более 1. При этом каждый раз принимали  $\tau_{\alpha}$  соответствующее  $n$ , полученному в предыдущем расчете. В том случае, когда количество образцов в выборке превышало 31, вместо квантиля распределения Стьюдента  $\tau_{\alpha}$  в формулу (40) подставляли квантиль нормального распределения. Если по результатам испытаний данной серии из  $n$  образцов был получен такой коэффициент вариации  $V$ , что относительная погрешность  $d_{\alpha}$  оказывалась больше допустимой, по формуле (40) устанавливали необходимый новый объем выборки, исходя из фактического значения  $V$ . Для этого испытывали дополнительное количество образцов или проводили повторные испытания.

Количество образцов древесины для определения каждого параметра равно 15. Относительная среднеквадратичная погрешность измеренных сопротивлений и веса, образцов не превышает 2 - 4 %. Для осредненных (генерализованных) параметров – 3 - 5%.

### 3.2. Результаты исследования гигроскопичности (влагопоглощения) древесины

Гигроскопичность характеризует свойство капиллярно-пористого тела в определенных температурно-влажностных условиях поглощать (сорбировать) водяной пар из окружающей среды, в качестве которой в последующем рассматривается атмосферный воздух. Гигроскопичность абсолютно сухой древесины обусловлена гидрофильностью древесного вещества и коллоидной природой клеточных стенок, благодаря чему при взаимодействии древесины с водой или водяным паром в ней образуется огромная поверхность раздела твердое тело-вода. В общем случае гигроскопичность древесины определяется поверхностными явлениями, происходящими при взаимодействии древесины с водой, на границе раздела трех фаз твердое тело - пар, твердое тело - вода, вода - пар. В количественном отношении гигроскопичность определяется известными закономерностями поверхностных явлений, а в качественном - специфическими свойствами древесины как адсорбента и воды, как адсорбата.

Первопричиной гидрофильности древесного вещества является наличие в основных компонентах древесины - целлюлозе, лигнине и особенно гемицеллюлозах - гидроксильных и других полярных групп (центров адсорбции), вступающих во взаимодействие с полярными молекулами воды. Термодинамические взаимодействия между ними обеспечиваются тем, что энергия связи гидроксильных групп древесного вещества с водой больше энергии межмолекулярного взаимодействия в воде. Сущность этого взаимодействия в установлении водородных связей между атомами кислорода в гидроксильных группах древесного вещества и атомами водорода молекул воды. [108, 109].

Древесина - это гигроскопический материал, способный изменять свою влажность при изменении состояния окружающего воздуха. Гигроскопическая или связанная влага удерживается в основном физико-химическими связями; ее удаление сопряжено с весьма значительными затратами энергии и существенно отражается на большинстве свойств древесины. Свободная влага, удерживаемая только физико-механическими связями, удаляется значительно легче и оказывает меньшее влияние на свойства древесины.

Гигроскопичность (влагопоглощение) натуральной древесины является хорошо изученным вопросом [66, 110, 111]. Однако гигроскопичность пропитанной древесины при увлажнении атмосферными осадками в условиях эксплуатации ВЛ 10 кВ в течение первых 6-7 часов представляет практический интерес [119-122]. По сведениям, приведенным в работах [112, 113], пропитанная древесина (береза, дуб) при пребывании в воде в течение 20 суток имела поглощение влаги 3 - 6%.

При испытании исследовались образцы различной пропитки и степени концентрации 100, 75 и 50% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочих растворов, на гигроскопичность при постоянной температуре 20 и 40°C с изменением относительной влажности в диапазоне 20-95%.

Результаты экспериментальных исследований гигроскопичности сосны, пропитанной 50-100% -ной концентрацией от рекомендуемых соответствующими ГОСТами рабочих растворов антисептиков, консервантов и антипиренов от влажности среды при постоянной температуре 20°C представлены на рис. 10, 11, 14, а при постоянной температуре 40°C на рис. 12, 13, 15.

Анализ зависимостей образцов сосны (рис. 10; 11, а; 14, а) показывает, что гигроскопичность сосны, пропитанной NaF 50 и 75% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентраций рабочих растворов, в диапазоне изменения влажности практически не изменилась по величине, зависимость  $W_r$  ( $W\%$ ) линейна. Однако гигроскопичность сосны при 100 % от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочих растворов пропитки изменяется по нелинейному закону, нижний предел при этом величины  $W_r$  стал изменяться с  $4,11 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> (рис. 14, а), по сравнению с  $4,19 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> (рис. 10, а). Следовательно, в пределах влажности 20-60 % и при температуре 20°C среды величина  $W_r$  изменяется линейно и незначительно, при 50 и 75% концентрации препарата; гигроскопичность сосны с ростом концентрации пропитки NaF при относительной влажности 20% уменьшается. Гигроскопичность сосны, пропитанной ZnCl<sub>2</sub>, при указанных значениях концентрации препарата изменяется практически линейно в пределах от 4,09 до  $4,33 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Однако с ростом концентрации препарата пределы изменения  $W_r$  в диапазоне (20 - 98%) влажности уменьшаются с 0,17 до  $0,8 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> при одновременном росте величины гигроскопичности. Влагопоглощение сосны, пропитанной NH<sub>4</sub>F, зависит от степени концентрации, изменяется в пределах  $(4,085 \div 4,26) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, в пределах каждой степени концентрации пропитки ход зависимостей величины гигроскопичности почти одинаков; - гигроскопичность сосны, пропитанная (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> в указанных условиях испытания незначительно зависит от степени концентрации препарата. Это различие между конечными значениями линейной зависимости гигроскопичности составляет  $0,06 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность сосны, пропитанной Cu(C<sub>10</sub>H<sub>17</sub>OO<sub>2</sub>) изменяется линейно, возрастает с 4,56 до  $4,82 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Однако в пределах каждой концентрации пропитки  $W_r$  - изменяется незначительно  $(0,10 \div 0,06) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>.

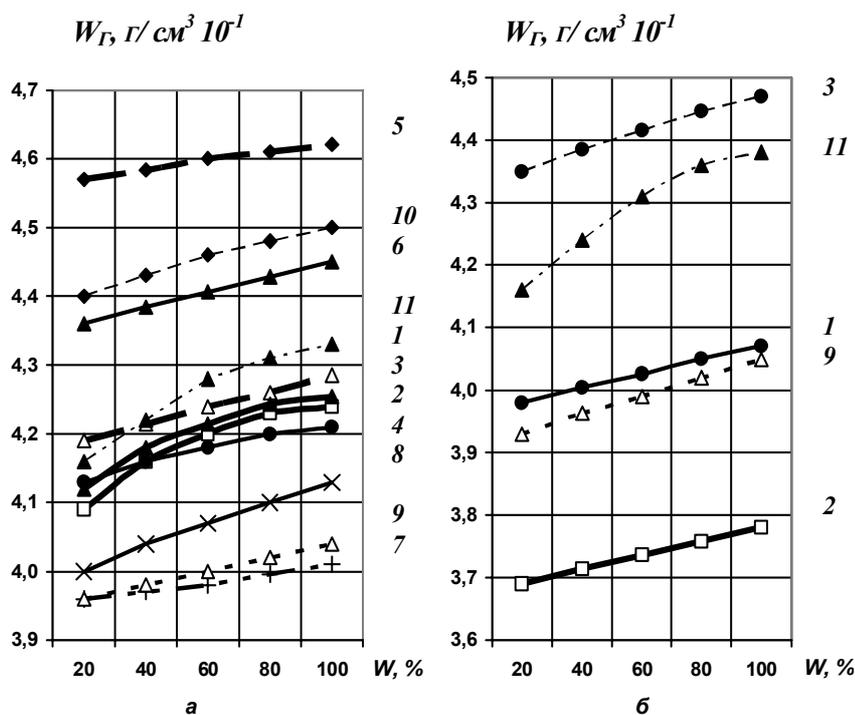


Рис. 10. Зависимость гигроскопичности древесины сосны пропитанной антисептиками, консервантами (а) и антипиренами (б) 50% концентрации рабочих растворов от влажности при постоянной температуре 20°C. Препараты: а) 1. NaF; 2.  $ZnCl_2$ ; 3.  $NH_4F$ ; 4.  $(NH_4)SiF_6$ ; 5.  $Cu(C_{10}H_{17}OO_2)$ ; 6. ХМ-11; 7. ПХФН; 8. ФБС-211; 9. БС-13; 10. КМ; 11. натуральная древесина б) 1. ФБС-255; 2. ДМ-11; 3.  $(NH_4)_2SO_4$ ; 9. БС-13; 11. натуральная древесина

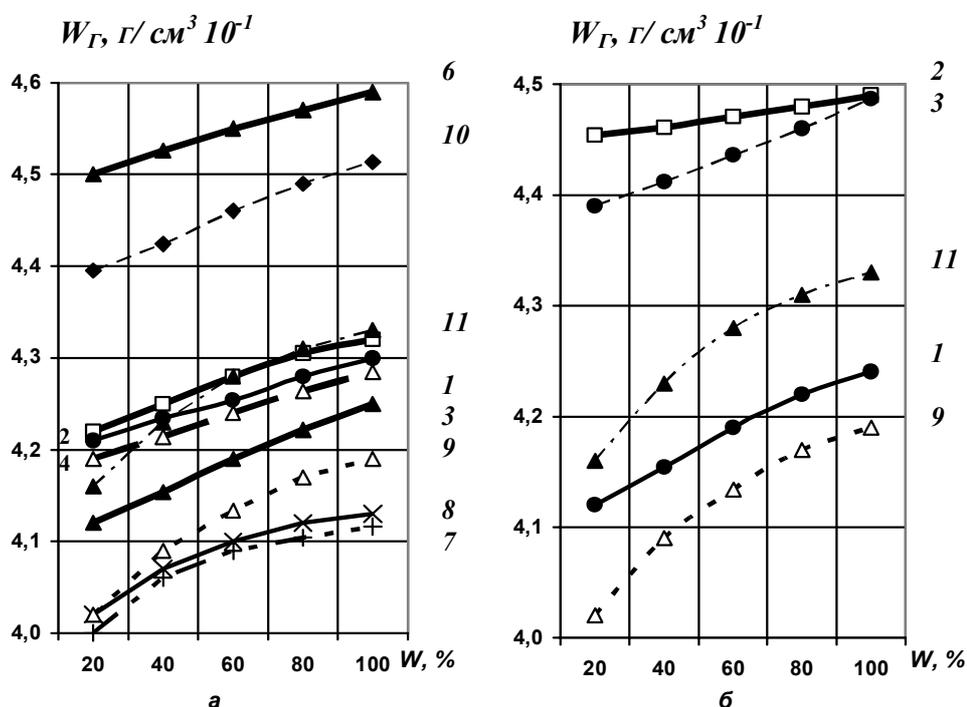


Рис. 11. Зависимость гигроскопичности древесины сосны пропитанной антисептиками, консервантами (а) и антипиренами (б) 75% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочих растворов от влажности при постоянной температуре 20°C. Препараты: а) 1. NaF; 2.  $ZnCl_2$ ; 3.  $NH_4F$ ; 4.  $(NH_4)SiF_6$ ; 6. ХМ-11; 7. ПХФН; 8. ФБС-211; 9. БС-13; 10. КМ; 11. натуральная древесина б) 1. ФБС-255; 2. ДМ-11; 3.  $(NH_4)_2SO_4$ ; 9. БС-13; 11. натуральная древесина

Гигроскопичность сосны, пропитанная ПХФН, слабо зависит от температуры, влажности и концентрации раствора и изменяется с  $3,75$  до  $4,15 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность сосны, пропитанная ФБС-211, изменяется в пределах  $(4,0 \div 4,35) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, а в пределах значений испытания каждой концентрации пропитки изменяется на величину  $0,1 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>; - гигроскопичность сосны, пропитанная БС-13, изменяется в пределах  $(3,56 \div 4,18) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, незначительно зависит от концентрации препарата. В среднем величина  $W_r$  изменяется на величину  $0,1 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> в пределах каждого процентного содержания концентрации препарата. Гигроскопичность сосны, пропитанная ХМ-11, изменяется при температуре 20°С и указанных процентах содержания концентрации препарата в пределах  $(4,36 \div 4,84) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, а в пределах каждой концентрации в диапазоне  $(0,03 \div 0,1) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Влапоглощение сосны, пропитанной КМ изменяется в пределах  $(4,40 \div 4,72) \cdot 10^{-1}$  в среднем значение  $W_r$  изменяется на величину  $0,07 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> в пределах каждых значений концентрации; гигроскопичность натуральной древесины сосны, пропитки возрастает с  $4,16$  до  $4,36 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>.

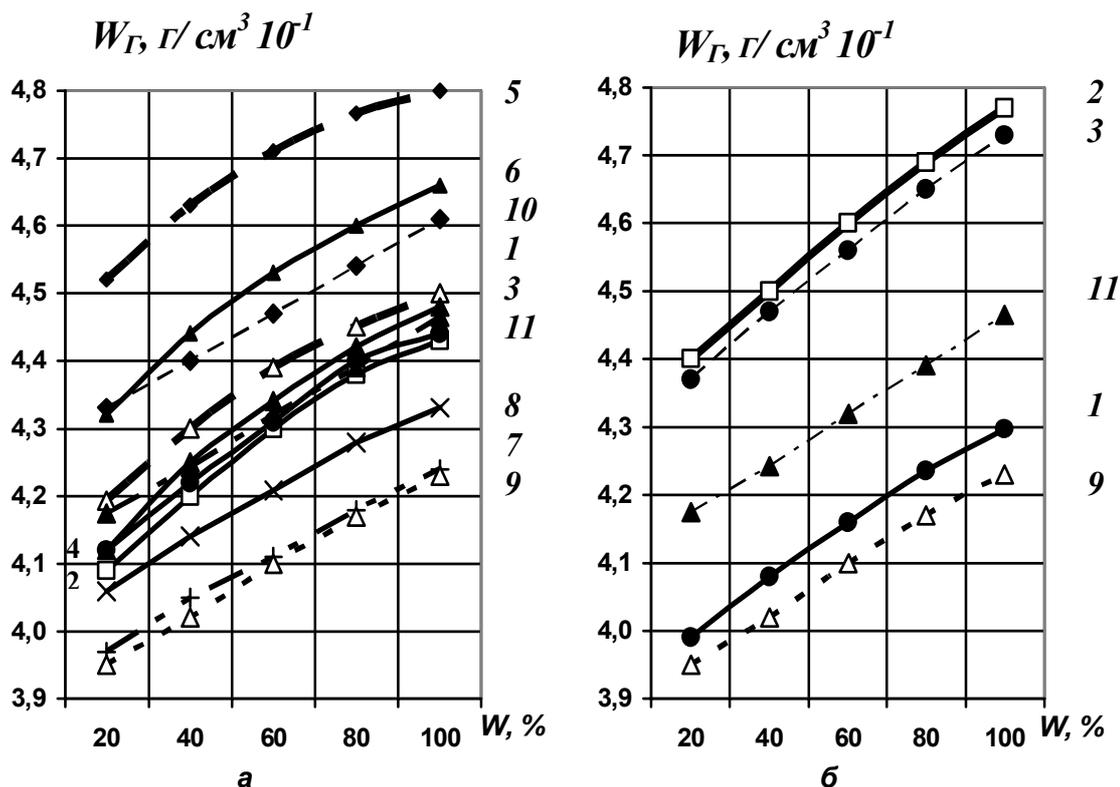


Рис. 12. Зависимость гигроскопичности древесины сосны пропитанной антисептиками, консервантами (а) и антипиренами (б) 50% концентрации рабочих растворов от влажности при постоянной температуре 40°С. Препараты: а) 1. NaF; 2. ZnCl<sub>2</sub>; 3. NH<sub>4</sub>F; 4. (NH<sub>4</sub>)SiF<sub>6</sub>; 5. Cu(C<sub>10</sub>H<sub>17</sub>OO<sub>2</sub>); б) 6. ХМ-11; 7. ПХФН; 8. ФБС-211; 9. БС-13; 10. КМ; 11. натуральная древесина б) 1. ФБС-255; 2. ДМ-11; 3. (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 9. БС-13; 11. натуральная древесина

Влагопоглощение сосны, пропитанной составом «Галиах», 100% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочих растворов пропитки в пределах влажности 20-95 % и температуре среды 20°C изменяется по линейному закону, при этом величина гигроскопичности сосны  $W_r$  изменяется с  $5,19 \cdot 10^{-1} \div 5,33 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность сосны, пропитанной препаратом БК, при указанных значениях эксперимента изменяется практически  $W_r$  линейно. Величина  $W_r$  в диапазоне от 20 до 95% влажности увеличиваются с 4,61 до  $5,022 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Влагопоглощение сосны, пропитанной антисептиком К-12, изменяется в пределах  $(4,56 \div 4,76) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность во всем диапазоне влажности изменяется по линейному закону, условия эксперимента прежние. Влагопоглощение сосны, пропитанной защитным препаратом МБ, при тех же условиях проведения испытаний изменяется линейно в диапазоне (20 - 60%) влажности, а при влажности от 60% до 95% характер изменения  $W_r$  становится нелинейным. Величина  $W_r$  в диапазоне от 20 до 95% влажности увеличиваются с 4,39 до  $4,70 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>.

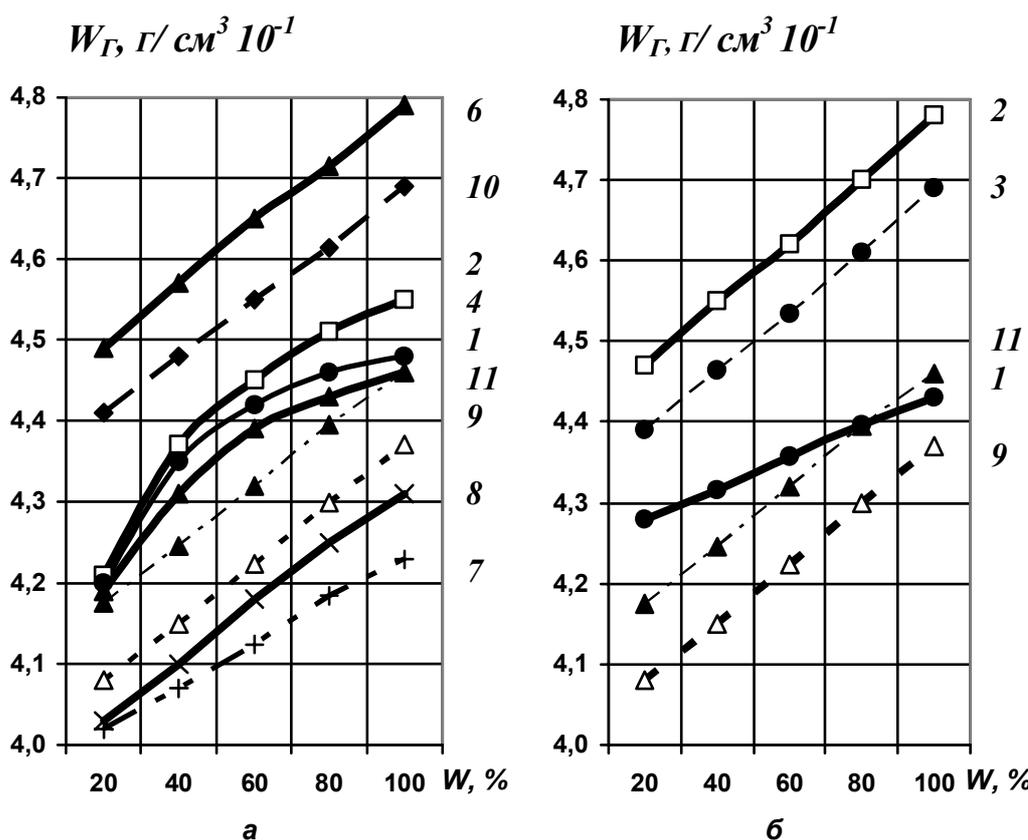


Рис. 13. Зависимость гигроскопичности древесины сосны пропитанной антисептиками, консервантами (а) и антипиренами (б) 75% концентрации рабочих растворов от влажности при постоянной температуре 40°C. Препараты: а) 1. NaF; 2. ZnCl<sub>2</sub>; 4. (NH<sub>4</sub>)SiF<sub>6</sub>; 6. ХМ-11; 7. ПХФН; 8. ФБС-211; 9. БС-13; 10. КМ; 11. натуральная древесина б) 1. ФБС-255; 2. ДМ-11; 3. (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 9. БС-13; 11. натуральная древесина

Рассмотрим результаты исследования гигроскопичности сосны, пропитанной 50÷100% -ными от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрациями рабочих растворов антипиренов и консервантов. На рис. 10; 11, б; ÷ 14, б представлена зависимость гигроскопичной пропитанной древесины 100% концентрации рабочих растворов от влажности среды при постоянной температуре 20°C.

Анализ этих зависимостей показывает, что: - гигроскопичность сосны, пропитанной ФБС-255, изменяется в пределах  $(3,98 \div 4,30) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ , увеличивается с ростом концентрации препарата; - гигроскопичность сосны, пропитанной ДМ-11, изменяется в пределах  $(3,69 \div 4,62) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ , среднее значение изменения  $W_r$  в пределах каждой концентрации пропитки составит  $0,15 \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Самые низкие значения  $W_r$  соответствуют условию пропитки сосны 50%-ной от рекомендуемой соответствующими ГОСТами концентрации рабочего раствора. Гигроскопичность сосны, пропитанной  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  изменяется в пределах  $(4,36 \div 4,64) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ , среднее значение изменения  $W_r$  в пределах каждой концентрации пропитки составляет  $0,08 \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ .

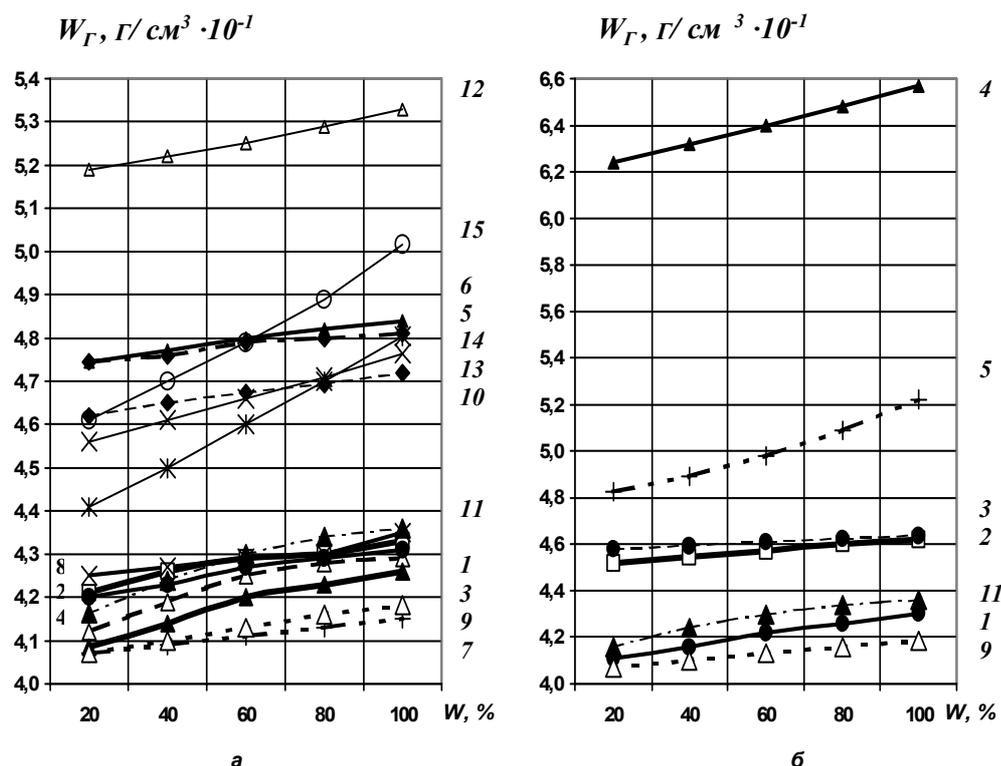


Рис. 14. Зависимость гигроскопичности древесины сосны пропитанной антисептиками, консервантами (а) и антипиренами, консервантами (б) 100% концентрации рабочих растворов от влажности при постоянной температуре 20°C. Препараты: а) 1. NaF; 2.  $\text{ZnCl}_2$ ; 3.  $\text{NH}_4\text{F}$ ; 4.  $(\text{NH}_4)\text{SiF}_6$ ; 5.  $\text{Cu}(\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{OO}_2)$ ; 6. ХМ-11; 7. ПХФН; 8. ФБС-211; 9. БС-13; 10. КМ; 12. Галиах; 13. К-12; 14. МБ; 15. БК; 11. натуральная древесина б) 1. ФБС-255; 2. ДМ-11; 3.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; 4. ХМФС; 5. ПХДС-Т; 9. БС-13; 11. натуральная древесина

Для древесины сосны, консервированной препаратом ХМФС, при указанных условиях эксперимента, гигроскопичность изменяется в пределах  $(6,24...6,57) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ , а для консерванта ПХДС-Т, влагопоглощение древесины изменяется от  $4,82 \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$  до  $5,15 \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Изменение гигроскопичности для консерванта ХМФС во всем диапазоне (20...95%) влажности изменяется по линейному закону, в отличие от консерванта ПХДС-Т изменение влагопоглощения, которого имеет нелинейный характер. Проведенные исследования позволили установить, что консервирование древесины увеличивает ее влагопоглощение в 1,5 раза по сравнению с натуральной древесиной.

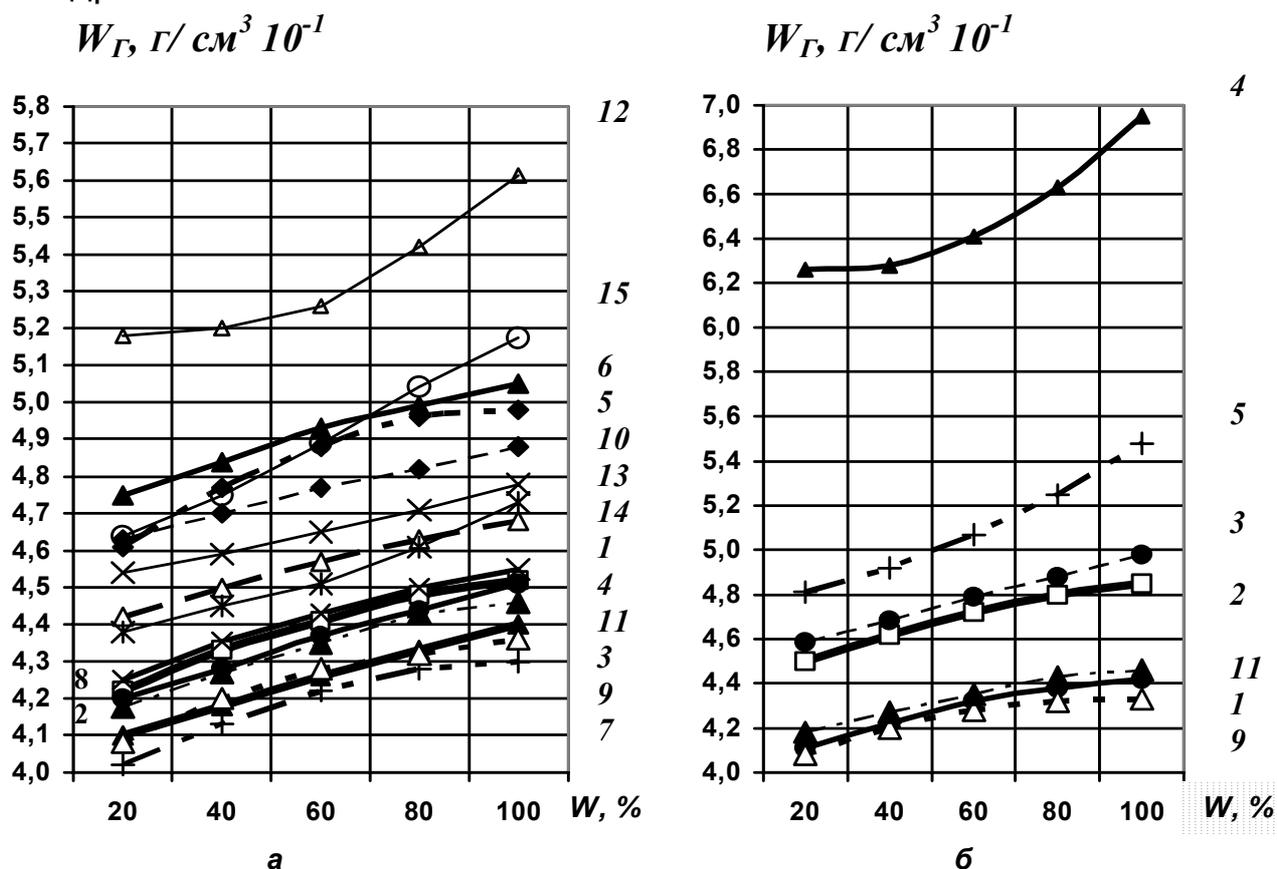


Рис. 15. Зависимость гигроскопичности древесины сосны пропитанной антисептиками, консервантами (а) и антипиренами, консервантами (б) 100% концентрации рабочих растворов от влажности при постоянной температуре  $40^\circ\text{C}$ . Препараты: а) 1. NaF; 2.  $\text{ZnCl}_2$ ; 3.  $\text{NH}_4\text{F}$ ; 4.  $(\text{NH}_4)\text{SiF}_6$ ; 5.  $\text{Cu}(\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{OO}_2)_2$ ; 6. ХМ-11; 7. ПХФН; 8. ФБС-211; 9. БС-13; 10. КМ; 12. Галиах; 13. К-12; 14. МБ; 15. БК; б) 1. ФБС-255; 2. ДМ-11; 3.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; 4. ХМФС; 5. ПХДС-Т; 9. БС-13; 11. натуральная древесина

Рассмотрим результаты исследований гигроскопичности сосны, пропитанной 50-100% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентраций рабочих растворов антисептиков и консервантов от влажности среды при постоянной температуре  $40^\circ\text{C}$ , которые представлены на рис. 12÷13, а ÷ 15, а. Анализ зависимостей

гигроскопичности сосны показывает, что: - гигроскопичность сосны, пропитанной NaF, изменяется в пределах  $(4,19 \div 4,5) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> при 50% от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочего раствора,  $(4,2 \div 4,48) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> – при 75%; и  $(4,42 \div 4,68) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> – при 100%; следовательно, с ростом концентрации препарата пределы изменения величины  $W_r$  в диапазоне влажности 20-98% уменьшаются, но в целом значения  $W_r$  сосны возрастают в условиях испытания; в характере изменения гигроскопичности сосны, пропитанной ZnCl<sub>2</sub>, отмечаются те же закономерности изменения  $W_r$ , описанные для случая температуры 20°C. С ростом концентрации препарата пределы изменения  $W_r$  уменьшаются с 0,37 до  $0,3 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависимость гигроскопичности в пределах каждой концентрации имеет возрастающий характер. Картина изменения гигроскопичности сосны, пропитанной NH<sub>4</sub>F, незначительно отличается от характера изменения этого свойства при 20°C. Гигроскопичность сосны, пропитанная (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, незначительно зависит от процентного содержания концентрации препарата, различие составляет  $0,03 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>; - гигроскопичность сосны, пропитанная Cu(C<sub>10</sub>H<sub>17</sub>OO<sub>2</sub>) изменяется от 4,52 до  $4,98 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, в пределах каждой концентрации пропитки  $(0,28 \div 0,37) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность сосны, пропитанная ХМ-11, изменяется при температуре 40°C и указанных значениях процентного содержания концентрации препарата в пределах  $(4,50 \div 5,05) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, а в пределах каждой концентрации  $(0,28 \div 0,3) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность сосны, пропитанная ПХФН, в указанных условиях эксперимента изменяется с 3,97 до  $4,3 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Гигроскопичность сосны, пропитанная ФБС-211, изменяется в пределах  $(4,1 \div 4,55) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, а в пределах значений каждой концентрации  $(0,2 \div 0,3) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>; - гигроскопичность сосны, пропитанная БС-13, изменяется в пределах  $(3,95 \div 4,36) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> и незначительно зависит от концентрации препарата. В среднем величина  $W_r$  изменяется на величину  $0,28 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> в пределах каждого процентного содержания концентрации препарата; - гигроскопичность сосны, пропитанная КМ, изменяется в пределах  $(4,34 \div 4,88) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> и в среднем на  $0,26 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> для каждого процентного содержания концентрации пропитки. Гигроскопичность сосны пропитанной защитным препаратом «Галиах» изменяется в пределах  $(5,18 \div 5,61) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, прирост  $W_r$  увеличился с  $0,14 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, при температуре 20°C, до  $0,434 \cdot 10^{-1}$  г/см при температуре 40°C. Изменение влагопоглощения во всем диапазоне влажности носит нелинейный характер. Для сосны пропитанной антисептиком К-12  $W_r$ , в указанных условиях эксперимента, изменяется по линейному закону и составляет  $(4,54 \div 4,78) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Температура незначительно влияет на гигроскопичность сосны, пропитанной препаратом К-12. Влагопоглощение сосны, пропитанной защитным препаратом МБ,

изменяется линейно во всем диапазоне влажности, и изменения гигроскопичности составляют  $(4,38 \div 4,75) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Влажность оказывает большее влияние на прирост  $W_r$ , чем температура и составляет  $0,368 \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Гигроскопичность сосны, пропитанной препаратом БК, при 100% от рекомендуемой ГОСТами концентрации пропитки изменяется в пределах  $(4,64 \dots 5,17) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Изменения гигроскопичности сосны при варьирующей влажности носит линейный характер. Гигроскопичность натуральной древесины изменяется в пределах  $(4,18 \div 4,46) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Изменения гигроскопичности в диапазоне влажности от 20% до 60% имеет линейный характер, при увеличении влажности до 95% изменение влагопоглощения становится нелинейным.

Прирост гигроскопичности  $W_r$  натуральной и пропитанной древесины сосны при изменении относительной влажности воздуха в диапазоне 20-95% при постоянной температуре 20 и 40°C представлен в таблице 6.

Таблица 6

**Прирост гигроскопичности  $W_r$  натуральной и консервированной древесины сосны при изменении относительной влажности воздуха в диапазоне 20-95% при постоянной температуре**

Химические препараты пропитки	Температура воздуха				Концентрация пропитки %, от рабочего раствора
	20 °С		40 °С		
	$W_r$ при 20 %, $\text{г/см}^3$	$W_r$ при 95 %, $\text{г/см}^3$	$W_r$ при 20 %, $\text{г/см}^3$	$W_r$ при 95 %, $\text{г/см}^3$	
<b>Антисептики и консерванты</b>					
NaF (ФН)	4,19	0,10	4,19	0,31	50
	4,185	0,110	4,20	0,285	75
	4,12	0,1	4,42	0,265	100
ZnCl <sub>2</sub> (ХЦ)	4,090	0,17	4,08	0,260	50
	4,220	0,11	4,22	0,33	75
	4,195	0,115	4,21	0,33	100
NH <sub>4</sub> F (ФА)	4,12	0,17	4,12	0,355	50
	4,12	0,125	-	-	75
	4,085	0,165	4,095	0,2	100
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (КФА)	4,145	0,020	4,13	0,315	50
	4,21	0,080	4,20	0,285	75
	4,195	0,112	4,20	0,30	100
Cu(C <sub>10</sub> H <sub>17</sub> OO <sub>2</sub> ) (НМ)	4,565	0,070	4,52	0,32	50
	-	-	-	-	75
	4,745	0,065	4,61	0,38	100
ХМ-11	4,36	0,09	4,50	0,315	50
	4,50	0,095	4,49	0,295	75
	4,745	0,10	4,75	0,30	100
ПХФН	3,750	0,13	3,975	0,270	50
	4,0	0,12	4,01	0,21	75
	4,01	0,095	4,02	0,285	100

Окончание таблицы 6

ФБС-211	4,05	0,08	4,05	0,29	50
	4,07	0,09	4,03	0,29	75
	4,25	0,095	4,245	0,30	100
БС-13	3,56	0,115	3,95	0,290	50
	4,02	0,165	4,06	0,31	75
	4,070	0,115	4,07	0,26	100
КМ	4,40	0,1	4,345	0,365	50
	4,40	0,12	4,42	0,26	75
	4,63	0,09	4,63	0,27	100
Галиах	5,19	0,14	5,18	0,434	100
К-12	4,56	0,204	4,54	0,237	100
МБ	4,40	0,404	4,38	0,436	100
БК	4,61	0,416	4,64	0,53	100
ХМФС	6,24	0,33	6,26	0,69	100
ПХДС-Т	4,82	0,4	4,81	0,67	100
<b>Антипирены</b>					
ФБС-255	3,985	0,105	3,995	0,30	50
	4,13	0,11	4,29	0,23	75
	4,13	0,175	4,13	0,30	100
ДМ-11	3,69	0,095	4,40	0,37	50
	4,46	0,025	4,47	0,30	75
	4,52	0,01	4,51	0,35	100
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> (СА)	4,36	0,1	4,37	0,36	50
	4,385	0,09	4,39	0,29	75
	4,58	0,06	4,585	0,40	100
<b>Натуральная древесина</b>					
-	4,160	0,20	4,18	0,28	-

Рассмотрим результаты исследования гигроскопичности сосны, пропитанной 50-75% и 100%-ной от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентраций рабочих растворов антипиренов и консервантов, которые представлены на рис. 12; 13, б; 15, б, от влажности при постоянной температуре 40°C.

Анализ зависимостей гигроскопичности сосны показывает, что:  
 - гигроскопичность сосны, пропитанной ФБС-255, изменяется в пределах  $(4,0 \div 4,42) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, увеличивается с ростом концентрации препарата; - гигроскопичность сосны, пропитанной ДМ-11, изменяется в пределах  $(4,4 \div 4,85) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Среднее значение изменения  $W_r$  в пределах каждой концентрации пропитки составляет  $0,34 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. С ростом процентного содержания концентрации пропитки сосны гигроскопичность её возрастает; - гигроскопичность сосны, пропитанная (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, изменяется в пределах  $(4,37 \div 4,98) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Среднее значение изменения  $W_r$  в пределах каждой концентрации препарата составляет  $0,35 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Влагопоглощение древесины консервированной препаратом ХМФС в указанных условиях эксперимента, изменяется в пределах  $(6,26 \div 6,95) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, прирост  $W_r$  увеличился в два раза, по сравнению с испытаниями при постоян-

ной температуре 20°C. Изменение влагопоглощения во всем диапазоне влажности носит нелинейный характер. Величина влагопоглощения сосны консервированной препаратом ПХДС-Т изменяется от  $4,81 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> до  $5,48 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, а прирост  $W_r$  составляет  $0,67 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Изменение гигроскопичности для консерванта ПХДС-Т во всем диапазоне (20...95%) влажности изменяется по нелинейному закону.

На основании проведенного анализа результатов экспериментального исследования гигроскопичности древесины, пропитанной антисептиками и консервантами, можно сделать следующее заключение:

1. Гигроскопичность сосны, пропитанной препаратом NaF, зависит от относительной влажности, температуры среды и концентрации рабочего раствора. С ростом температуры пределы изменения величины  $W_r$  в диапазоне (20 - 95%) влажности возрастают, так же как и в целом, абсолютные значения;
2. Гигроскопичность сосны, пропитанной препаратом ZnCl<sub>2</sub>, увеличивается с ростом влажности, температуры среды и концентрации препарата;
3. Концентрация пропитки древесины препаратом NH<sub>4</sub>F с ростом температуры среды увеличивает влагопоглощение на  $0,24 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> при 95% влажности и уменьшает её при 20% влажности на  $0,5 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>;
4. Концентрация пропитки древесины препаратом (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> при фиксированной температуре незначительно изменяет гигроскопичность, т.е. в пределах  $(0,03 \div 0,06) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Однако гигроскопичность увеличивается с ростом температуры, влажности и концентрации пропитки препарата на  $0,3 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Изменение гигроскопичности при этих же условиях, но при влажности 20%, не отмечается;
5. Гигроскопичность древесины, пропитанной Cu(C<sub>10</sub>H<sub>17</sub>OO<sub>2</sub>), с ростом температуры и концентрации рабочего раствора возрастает в пределах  $(4,56 \div 4,98) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>;
6. Гигроскопичность древесины сосны, пропитанной ХМ-11, при 20°C и 100% концентрации достигает  $4,84 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, а при 40°C и 75% концентрации  $5,05 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>;
7. Гигроскопичность сосны, пропитанной ПХФН, незначительно зависит от температуры, влажности и концентрации препарата; В пределах условий испытания  $W_r$  изменяется от 3,95 до  $4,3 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>;
8. Гигроскопичность сосны, пропитанной ФБС-211, изменяется в пределах  $(4,0 \div 4,55) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> незначительно зависит от указанных условий эксперимента;
9. Гигроскопичность сосны, пропитанной БС-13, изменяется в пределах  $(3,94 \div 4,33) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> незначительно зависит от

- условий эксперимента. При 20% относительной влажности гигроскопичность сосны составляет  $3,94 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> и не зависит от температуры среды и концентрации препарата;
10. Гигроскопичность сосны, пропитанной КМ изменяется в пределах  $(4,40 \div 4,88) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от температуры, влажности и концентрации раствора;
  11. Гигроскопичность сосны, пропитанной препаратом «Галиах» изменяется в пределах  $(5,18 \div 5,61) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от температуры и влажности;
  12. Гигроскопичность сосны, пропитанной К-12, изменяется в пределах  $(4,54 \div 4,78) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, незначительно зависит от указанных условий эксперимента;
  13. Гигроскопичность сосны, пропитанной МБ. изменяется в пределах  $(4,38 \div 4,75) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от условий испытаний;
  14. Гигроскопичность сосны, пропитанной БК, изменяется в пределах  $(4,61 \dots 5,17) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от температуры и влажности;
  15. Гигроскопичность сосны, пропитанной консервантом ПХДС-Т, изменяется в пределах  $(4,81 \dots 5,48) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Температура и влажность сильно влияют на влагопоглощение древесины сосны консервированной защитным препаратом;
  16. Гигроскопичность сосны, консервированной препаратом ХМФС, изменяется в пределах  $(6,24 \div 6,95) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от температуры и влажности;
  17. Гигроскопичность натуральной древесины изменяется в пределах  $(4,16 - 4,46) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от всех факторов, используемых в эксперименте;

Анализ графиков зависимости  $W_r$  ( $W^0\%$ ) при постоянной температуре 20°C показывает, что при 50%-ной от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочего раствора величина  $W_r$  для всех антисептиков и консервантов, изменяется в пределах  $(3,6 \div 4,7) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. С повышением концентрации препаратов резко выделяются три группы (рис. 14÷15, а и б) антисептиков при пропитке, которыми гигроскопичность древесины изменяется в пределах  $(4,01 \div 4,345) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> в одной, в пределах  $(4,4 \div 5,026) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> - во второй и в пределах  $(5,19 \div 6,75) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> - в третьей. К третьей группе относятся консерванты Галиах и ХМФС, ко второй антисептики БК и К-12; консерванты КМ, ХМ-11,  $\text{Cu}(\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{OO}_2)$ , МБ и ПХДС-Т, а к первой все остальные. Характерная особенность, которая наблюдается при испытании древесины при 20°C и при 100%-ной от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрации рабочего раствора - это объединение в группы антисептиков, по величине изменения  $W_r$ , не наблюдается при испытании постоянной темпера-

турой 40°C. При температуре 40°C наблюдается разброс зависимостей  $W_r$  ( $W\%$ ) в пределах изменения  $(3,95 \div 6,95) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ .

По результатам испытания древесины, пропитанной антипиренами, можно сделать следующее заключение:

1. Гигроскопичность сосны, пропитанной ФБС-255, изменяется в пределах  $(3,98 \div 4,43) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ , более зависит от температуры, чем от влажности среды;
2. Гигроскопичность сосны, пропитанной ДМ-11, изменяется в пределах  $(3,7 \div 4,85) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ . Самое низкое значение  $W_r$  имеет сосна, пропитанная 50%-ной от рекомендуемых соответствующими ГОСТами концентрацией рабочего раствора в условиях испытания при температуре 20°C. При высоких концентрациях препарата с увеличением температуры и влажности среды величина  $W_r$  возрастает;
3. Гигроскопичность сосны, пропитанной  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , изменяется в пределах  $(4,36 \div 4,98) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$ , в основном зависит от температуры среды. Так, при 20°C и при пропитке сосны антипиренами, величина  $W_r$  в диапазоне 20-90% относительной влажности изменяется в пределах  $0,18 \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$  от исходного значения  $W_r$ , т. е. значения  $W_r$  при 20% влажности. При 40°C размах величины  $W_r$  при указанных значениях возрастает в 4 - 5 раз.
4. Гигроскопичность сосны, пропитанной БС-13, изменяется в пределах  $(3,94 \div 4,33) \cdot 10^{-1} \text{ г/см}^3$  и незначительно зависит от условий эксперимента.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В первой, условно принятой, группе антисептиков и консервантов влагопоглощение древесины обработанной защитными химическими препаратами изменяется при изменении температуры и влажности и степени концентрации пропитки незначительно. Древесина, пропитанная препаратами  $\text{NH}_4\text{F}$  (ФА), БС-13 и  $\text{NaF}$  (ФН) имеет самую низкую гигроскопичность относительно гигроскопичности древесины, пропитанной другими антисептиками. Они значительно улучшают это свойство древесины. Уменьшается влагопоглощение конструкционной древесины антисептированной этими препаратами по сравнению с натуральной древесиной. Положительные качества этих препаратов не изменяются и при испытании древесины, пропитанной ими при температуре 40°C. Следовательно, в условиях атмосферных загрязнений элементов ВЛ 10кВ, перекрытий изоляции при увлажнении целесообразно повышать надёжность и защиту изоляционных

деревянных конструкций от воздействия токов утечки и других негативных явлений применением этих препаратов.

2. Во второй группе антисептиков и консервантов наблюдается более сильная зависимость гигроскопичности пропитанной древесины от всех условий эксперимента, чем в первой группе. Наблюдается высокая гигроскопичность для сосны, пропитанной препаратами МБ, БК, и ПХДСТ, прирост гигроскопичности для этих антисептиков и консервантов изменяется в пределах от  $0,434 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> до  $0,67 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>. Древесина, пропитанная препаратами К-12, КМ имеет самую низкую гигроскопичность в этой группе. Обработка антисептиком К-12 снижает гигроскопичность пропитанной древесины по сравнению с натуральной древесиной. Влагопоглощение древесины, пропитанной этими антисептиками, сравнимо с антисептиками первой группы и поэтому они могут использоваться для повышения надёжности и защиты изоляционных деревянных конструкций ВЛ и КС.
3. В третьей группе гигроскопичность пропитанной древесины зависит от температуры, влажности и концентрации рабочего раствора. Древесина, пропитанная консервантом Галиах и ХМФС, имеет влагопоглощение самое высокое из всех исследуемых в работе антисептиков и консервантов. Следовательно, пропитка элементов ВЛ 10 кВ препаратами второй и третьей группы, кроме указанных К-12 и КМ, с точки зрения защиты от гниения для тех районов эксплуатации, где ограничено биоповреждение, а доминируют разрушения токами утечки нецелесообразно.
4. Гигроскопичность сосны, пропитанной антипиренами, при высоких концентрациях препарата с увеличением температуры и влажности среды возрастает. Деревянные конструкции, пропитанные препаратом БС-13 и ФБС-255, имеют самую низкую гигроскопичность из исследуемой группы антипиренов. Огнезащитная обработка препаратом ФБС-255 конструкционной древесины целесообразна, при высокой влажности окружающей среды, а также от воздействия токов утечки и других негативных явлений. Необходимо выделить био-огнезащитный химический препарат БС-13, который может применяться как антисептик и антипирен в районах с повышенной влажностью.
5. Влагопоглощение натуральной древесины изменяется в пределах  $(4,16 - 4,46) \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, зависит от всех факторов, используемых в эксперименте

### 3.3. Результаты исследования электрического сопротивления древесины

Древесина имеет анизотропное строение. Наиболее высокими механическими и наихудшими электрическими свойствами древесина обладает в направлении вдоль ствола. Механические и электрические свойства древесины зависят от влажности, причем с повышением последней те и другие характеристики значительно ухудшаются. Удельное объемное сопротивление  $\rho_V$  сосны в воздушно-сухом состоянии равно  $8 \cdot 10^{10}$  Ом·см, ели -  $6 \cdot 10^{10}$  Ом·см, березы -  $5 \cdot 10^{10}$  Ом·см [113].

Электропроводность непропитанной древесины непостоянна и зависит от породы, температуры и особенно от влажности материала [114]. Сопротивление древесины прохождению постоянного тока колеблется в значительной степени в зависимости от влажности, особенно при влажности, ниже 30% - точки насыщения волокон, причем оно снижается по мере повышения влажности. Сопротивление древесины больше поперек волокон, чем вдоль их; величина этого  $R$  приблизительно удваивается при падении температуры на каждые  $12,5^\circ\text{C}$  и уменьшается с увеличением плотности древесины [85]. Сопротивление древесины прохождению тока может возрасти в  $10^5$  раз при падении влажности с 20% до 7%. Влажность древесины, используемой в ЛЭП и изделиях в качестве изоляционного материала, приобретает исключительно большое значение.

Зависимость величин  $R_S$  и  $R_V$  древесины при низких температурах, представлена на рис. 16.

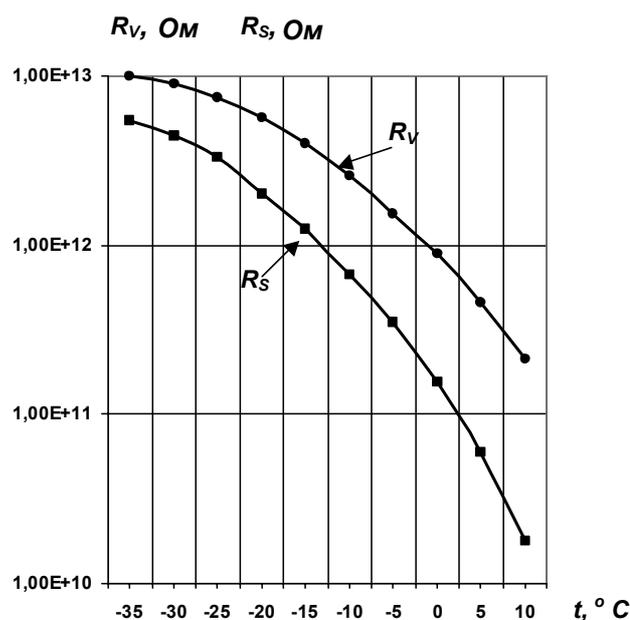


Рис. 16. Зависимость усредненных объемных и поверхностных сопротивлений натуральной древесины сосны при низких температурах

В широком диапазоне изменения температуры от 0 до  $-35^{\circ}\text{C}$  значения  $R_s$  и  $R_v$  возрастают. В этом диапазоне температур величина  $R_s$  изменяется от  $1,8 \cdot 10^{10}$  до  $6 \cdot 10^{12}$  Ом, а значения  $R_v$  возрастают в пределах одного порядка от  $2 \cdot 10^{11}$  до  $10^{13}$  Ом. Кривые, выражающие зависимость сопротивления от температуры, имеют тенденцию к сближению. При температуре  $-35^{\circ}\text{C}$  разность значений  $R_s$  и  $R_v$  составляет около 200 Ом. Очевидно, при дальнейшем понижении температуры можно полагать, что значения  $R_s$  и  $R_v$  сравняются.

Характер изменения значений  $R_v$  в диапазоне температур от  $10^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  при фиксируемой постоянной влажности приведён на рис. 17, б.

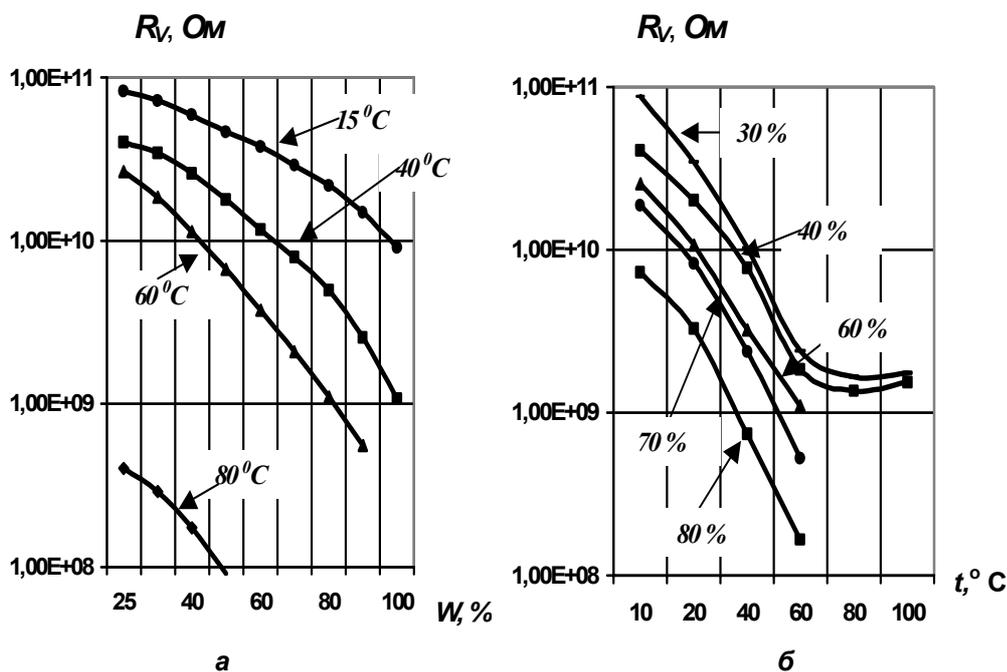


Рис 17. Зависимость усредненных объемных сопротивлений натуральной древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б)

Анализ кривых показывает, что в диапазоне указанных температур величина  $R_v$  с повышением влажности уменьшается от  $10^{11}$  Ом до  $10^8$  Ом. В пределах изменения температур от 10 до  $60^{\circ}\text{C}$  характер изменения зависимостей  $R_v=f(t)$  однотипен, линеен при различных значениях постоянной влажности испытания. Однако зависимость  $R_v=f(t)$  при температуре выше  $60^{\circ}\text{C}$  становится нелинейной. Величина  $R_v$  при постоянной относительной влажности испытания в пределах 30-60% и в диапазоне температур 60- $100^{\circ}\text{C}$  изменяется незначительно. С практической точки зрения наибольший интерес представляет вопрос влияния температуры на  $R$  в пределах ее изменения от 20 до  $45^{\circ}\text{C}$  при относительной влажности 30-60%. Следует отметить, что представленное на рис. 17, б семейство зависимостей  $R_v=f(t)$ , условно можно разделить на две группы. Первую

группу образуют кривые, снятые в диапазоне постоянной относительной влажности 30-60%. По данным эксперимента в диапазоне 30-60% относительной влажности уменьшение объемного сопротивления от температуры составляет чуть больше порядка. Во второй группе семейства кривых в диапазоне температур 10-60°C и постоянной относительной влажности испытания (более 70%) величина  $R_v$  уменьшилась почти на два порядка.

Характер зависимости кривых объемного сопротивления  $R_v$  древесины от относительной влажности при различных значениях постоянной температуры показан на рис. 17, а. Из графиков видно, что с увеличением влажности и ростом постоянных значений температуры среды испытания величина  $R_v$  уменьшается. Причем интенсивное уменьшение величины  $R_v$  наблюдается при температуре среды 60°C и более. Анализируя зависимости можно отметить, что величина  $R_v$  (рис. 17, б) при температуре 40°C и влажности 60% составляет  $5 \cdot 10^9$  Ом, а величина  $R_v$  (рис. 17, а) при тех же условиях -  $10^{10}$  Ом.

По результатам экспериментальных данных были построены кривые, по которым можно определить наиболее вероятное значение поверхностного сопротивления  $R_s$  древесины (рис. 18) при изменении температуры и постоянной относительной влажности (рис. 18, б) и изменения относительной влажности при постоянной температуре среды (рис. 18, а).

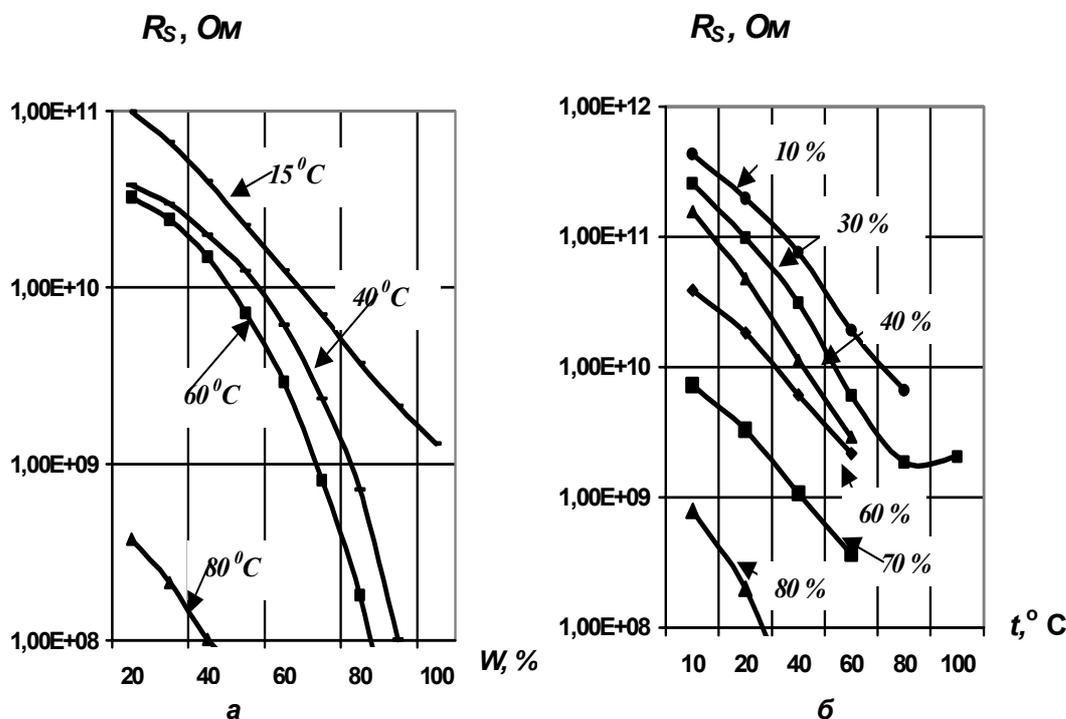


Рис. 18. Зависимость усредненных поверхностных сопротивлений натуральной древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б)

Как показывает анализ полученных кривых, семейство зависимостей  $R_s=f(t)$  (рис. 18, б) имеет линейный характер в диапазоне температур от 10 до 60°C. В этом диапазоне температур величина  $R_s$  при каждом значении постоянной относительной влажности испытания изменяется на порядок.

При указанных условиях величина  $R_s$  при температуре 20°C в сравнении со значением  $R_s$  при температуре 40°C возросла в целом лишь на пол порядка. Это необходимо учитывать при эксплуатации деревянных элементов ВЛ и при выборе химических средств защиты их от возгорания от токов утечки.

График зависимостей  $R_s$  от влажности при постоянной температуре, приведенный на рис. 18, а, показывает, что в диапазоне изменения влажности 30-60% и постоянной температуре 40°C величина  $R_s$  изменяется в пределах порядка. При этом среднее значение поверхностного сопротивления составило  $10^{10}$  Ом.

Сравнивая кривые, приведенные на рис. 18 можно отметить, что скорость изменения  $R_s$  в обоих случаях одинакова. Так, в первом случае (рис. 18, б) величина  $R_s$  при температуре 40°C и влажности 60% составила  $8 \cdot 10^9$  Ом, а во втором случае (рис. 18, а) -  $7 \cdot 10^9$  Ом. В характере изменения кривых, представленных на рис. 17, а и б; рис. 18, а и б можно отметить идентичность. Это имеет большое значение для практики и служит убедительным подтверждением достоверности данных эксперимента.

Зависимость удельных поверхностных  $\rho_s$  и удельных объемных сопротивлений  $\rho_v$  древесины сосны приведены на рис. 19 и 20 соответственно.

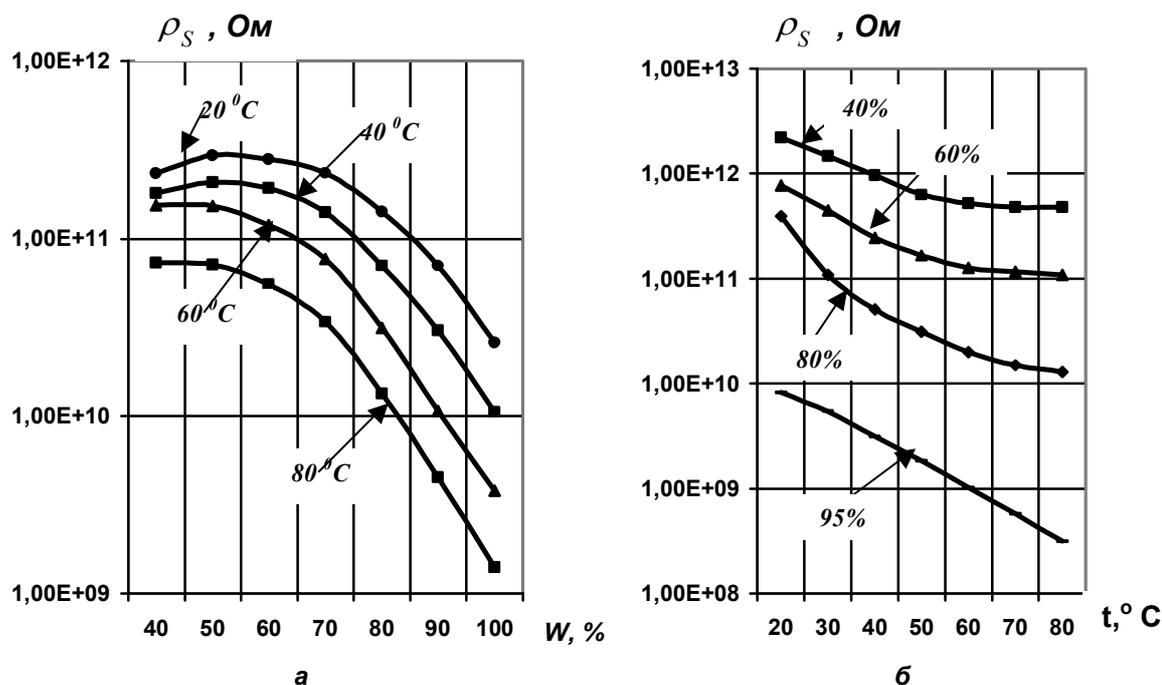


Рис. 19. Зависимость удельных поверхностных сопротивлений натуральной древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б)

На основании данных, приведенных на рис. 19 и 20, можно отметить, что влажность и температура существенно влияют на уменьшение величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$ . В характере изменения этих величин просматривается общая закономерность механических свойств древесины [102]. Разброс значения величин  $\rho_s$  и  $\rho_v$  с ростом температуры при различных значениях постоянной влажности более значителен в сравнении со значениями  $\rho_s$  и  $\rho_v$  при росте влажности и различных значениях постоянной температуры. Характер зависимости  $\rho_s$  от температуры и влажности сходен с характером изменения  $\rho_v$ . Однако при изменениях влажности окружающей среды более 60 % значения  $\rho_s$  изменяется быстрее, чем  $\rho_v$ . Повышение температуры древесины приводит к уменьшению величины  $\rho_v$ , причем, чем меньше влажность окружающей среды, тем меньше влияние температуры, что не согласуется с утверждением авторов [55].

По данным [97], пропитка защитными химическими составами древесины хотя и заметно снижает ее гигроскопичность, однако не в состоянии полностью предохранить от поглощения влаги. Величины  $\rho_v$  и  $\rho_s$  пропитанной олифой древесины березы в радиальном и в тангенциальном направлении  $\rho_v=8,8 \cdot 10^{12}$  Ом·см, а  $\rho_s=3,6 \cdot 10^{12}$  Ом.

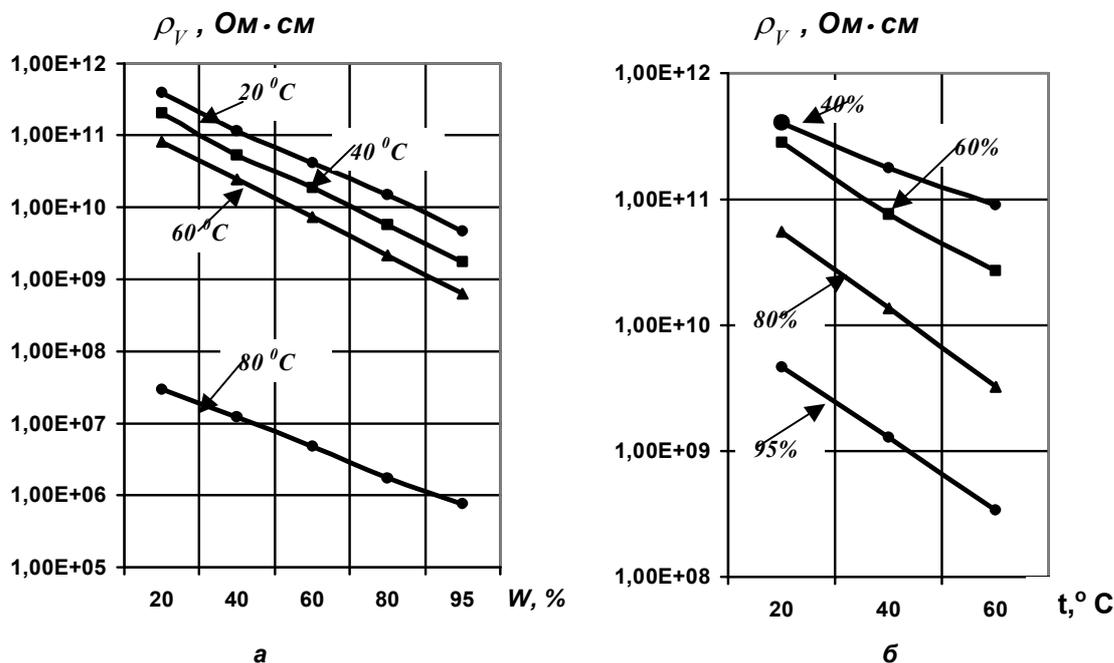


Рис. 20. Зависимость удельных объемных сопротивлений натуральной древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б)

По утверждению Горшина [25] электропроводность пропитанной древесины имеет еще большие колебания, чем не пропитанная. Древесина, пропитанная водорастворимыми защитными средствами, чаще имеет повышенную электропроводность, которая тем

больше, чем выше содержание соли в древесине. Древесина, пропитанная маслянистыми защитными средствами, наоборот, имеет пониженную электропроводность.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований электрического сопротивления, пропитанной препаратом КМ древесины сосны. На рис. 21 ÷ 23 приведены кривые зависимостей  $\rho_V$  и  $\rho_S$  от влажности при постоянной температуре и от температуры при постоянной влажности и соответствующей концентрации пропитки.

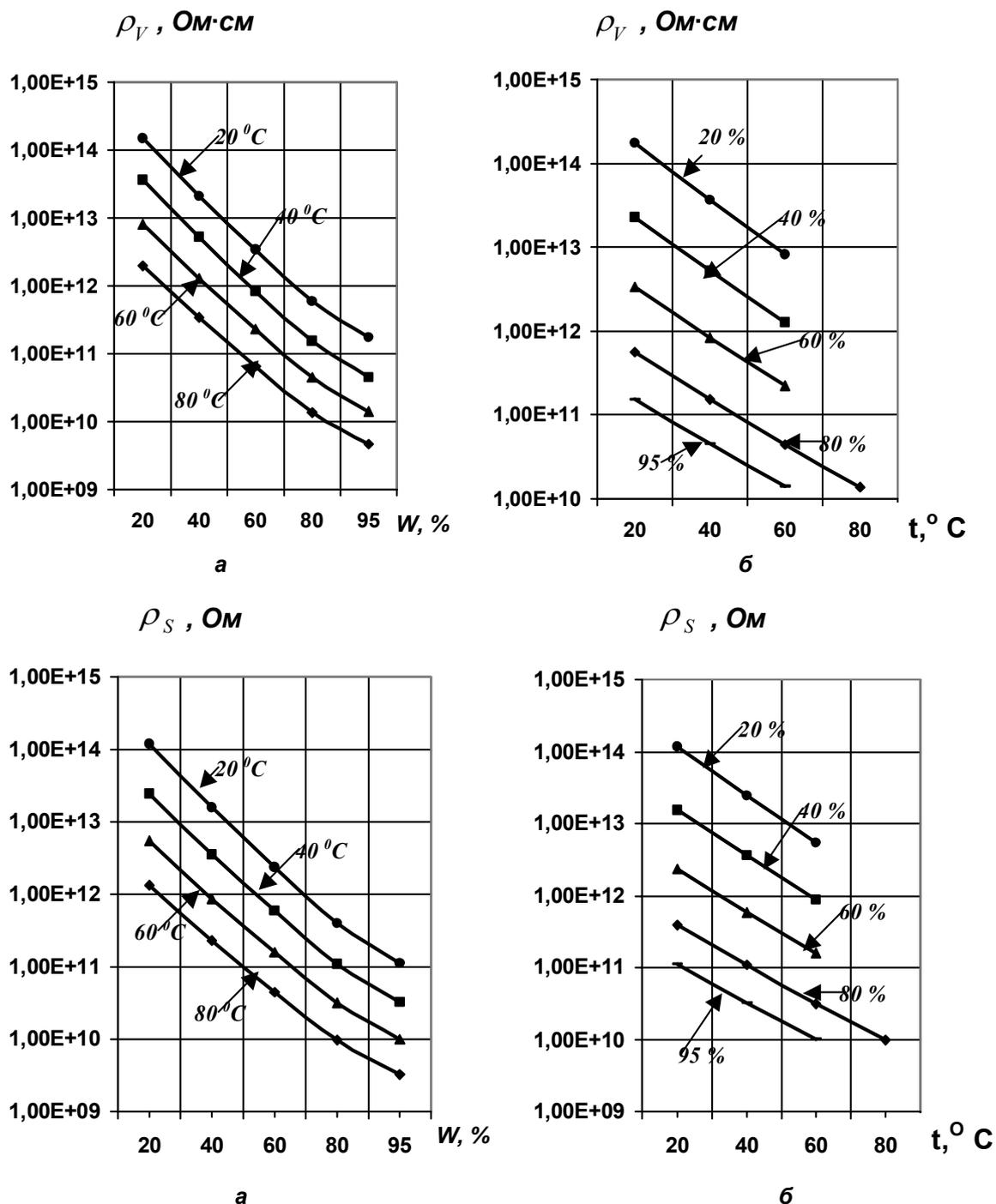


Рис. 21. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина консервирована «КМ» 50%-ной концентрацией рабочего раствора

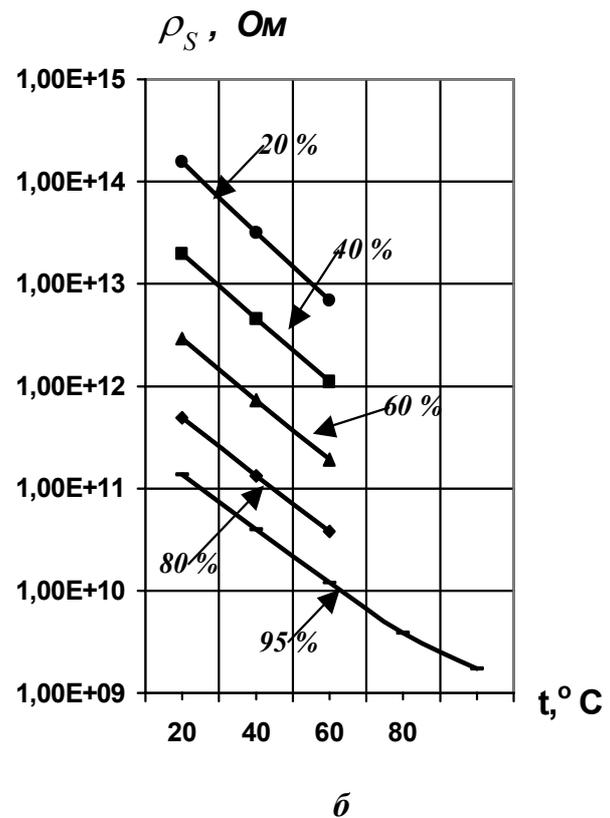
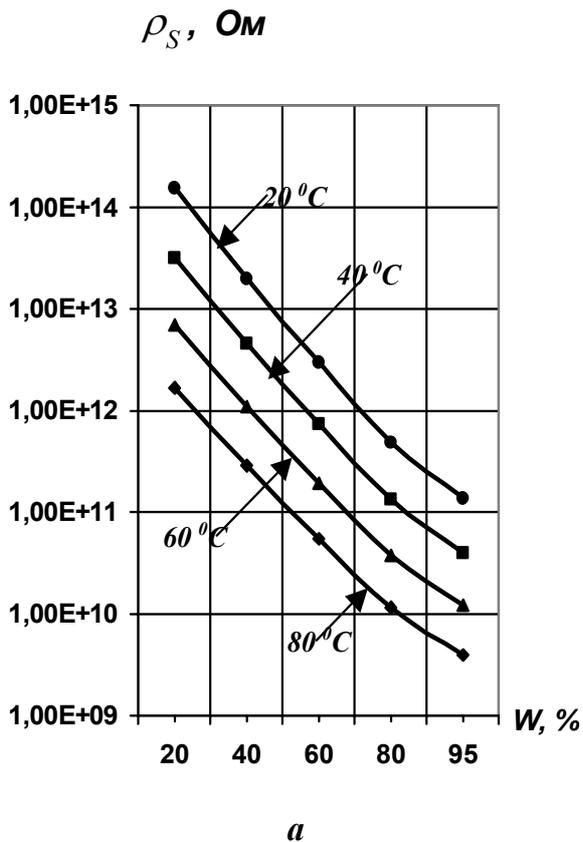
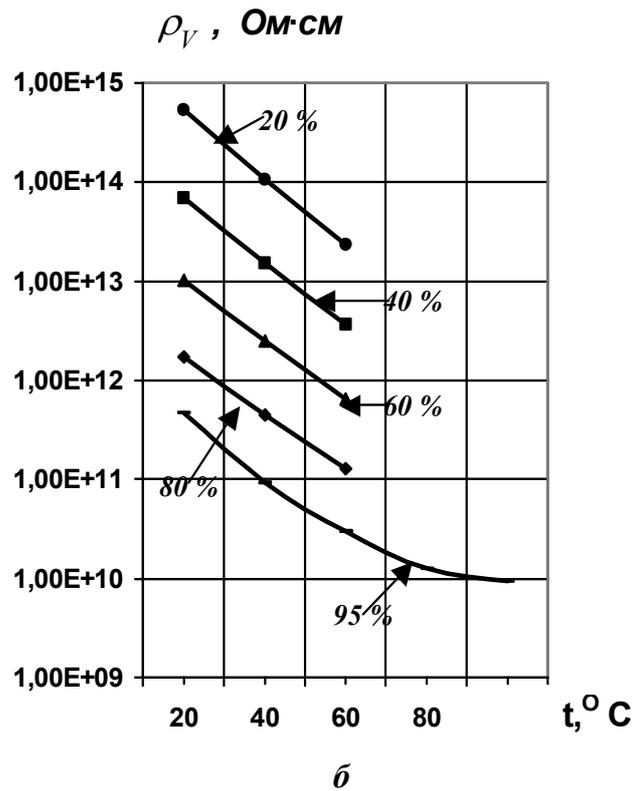
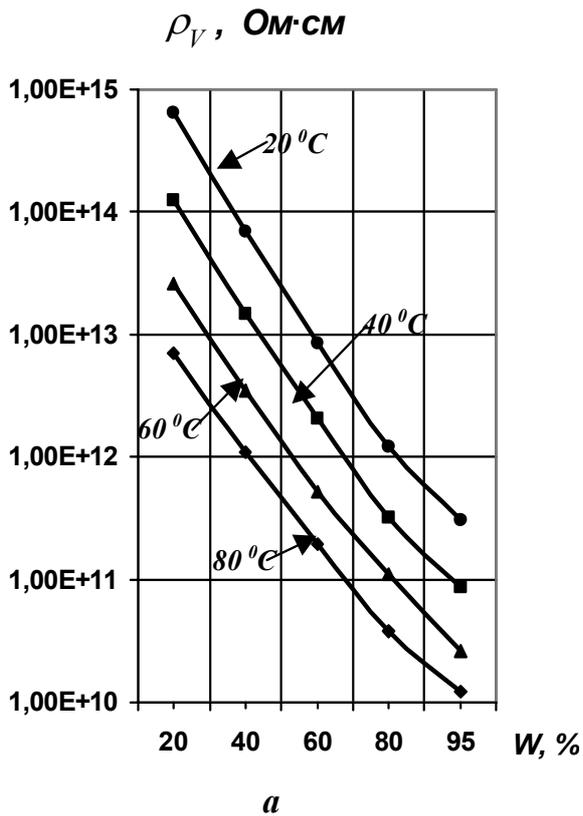


Рис. 22. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина консервирована «КМ» 75%-ной концентрацией рабочего раствора

Анализ зависимостей показывает, что увеличение концентрации пропитки древесины приводит к увеличению величины  $\rho_v$  в диапазоне температур  $20 \div 60^\circ\text{C}$  и соответствующей постоянной влажности примерно на порядок. Разброс кривых  $\rho_v=f(t)$  при постоянной влажности с увеличением концентрации пропитки увеличивается с  $2 \cdot 10^{10} \div 5 \cdot 10^{14}$  Ом·см до  $8 \cdot 10^{10} \div 10^{15}$  Ом·см. Величина  $\rho_v$  в диапазоне температур  $20 \div 60^\circ\text{C}$  в каждой группе пропитки древесины изменяется в пределах порядка и соответствующей влажности среды испытания. Величина  $\rho_s$ , также как и  $\rho_v$  древесины, зависит от концентрации ее пропитки и от температуры при соответствующей постоянной влажности. Разброс кривых  $\rho_s=f(t)$  при  $W=\text{const}$  с увеличением концентраций пропитки группы образцов сосредоточен в диапазоне  $(10^{10} \dots 10^{14}) \div (2 \cdot 10^9 \dots 5 \cdot 10^{13})$  Ом. Рост концентрации пропитки значительно уменьшает разброс зависимостей  $\rho_s=f(t)$ , чем это имеет место при рассмотрении кривых  $\rho_v=f(t)$ .

Если же полученные закономерности изменения  $\rho_v$  и  $\rho_s$  рассмотреть с точки зрения практической меры по ограничению возгорания древесины ВЛ, то следует отметить, что в диапазоне температур  $20 \div 60^\circ\text{C}$  и 60% влажности величина  $\rho_v$  изменяется в пределах  $7 \cdot 10^{12} \div 4 \cdot 10^{11}$ ;  $10^{13} \div 8 \cdot 10^{11}$ ,  $6 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{12}$  Ом·см, а  $\rho_s$  -  $5 \cdot 10^{12} \div 2 \cdot 10^{11}$ ,  $6 \cdot 10^{12} \div 3 \cdot 10^{11}$ ;  $5 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{12}$  Ом·см при 50, 75 и 100%-ной, от рекомендуемо по ГОСТ концентраций рабочего раствора соответственно. В требуемых условиях величина  $\rho_v$  изменилась больше, чем  $\rho_s$ . В целом можно отметить, что температура и влажность образцов древесины приводит к уменьшению величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$ , а увеличение концентрации пропитки к увеличению этих величин.

Анализ кривых  $\rho_v$  древесины, пропитанной КМ, от влажности при постоянной температуре и концентрации пропитки (рис. 21,а; 22,а; 23,а) показывает, что разброс зависимостей  $\rho_v=f(W)$  при  $t=\text{const}$  лежит в пределах  $7 \cdot 10^9 \div 2 \cdot 10^{14}$ ,  $10^{10} \div 8 \cdot 10^{14}$ ,  $10^{10} \div 10^{15}$  Ом·см при 50, 75 и 100%-ной, от рекомендуемой по ГОСТ концентрации рабочего раствора соответственно. Пределы изменения  $\rho_v$  для каждой группы пропитки составляют в среднем 4  $\div$  5 порядков. Пределы изменения величины  $\rho_s$  от влажности при  $t = \text{const}$  и соответствующей концентрации пропитки составляют  $5 \cdot 10^9 \div 1,5 \cdot 10^{14}$ ,  $8 \cdot 10^9 \div 2 \cdot 10^{14}$  и  $9 \cdot 10^8 \div 10^{14}$  Ом. Величина  $\rho_s$  в каждой группе пропитки в условиях эксперимента изменяется в среднем на 4,5  $\div$  5 порядков. Наименьшее влияние оказывает влажность на образцы древесины, пропитанные 75%-ной, от рекомендуемой по ГОСТ, концентрации рабочего раствора.

Анализ зависимостей приведенных на рис. 21  $\div$  23 показывает, что на величины  $\rho_v$  и  $\rho_s$ , пропитанной КМ древесины, влажность оказывает большее влияние, чем температура, при равных условиях эксперимента.

Приемлемыми для эксплуатации древесины ВЛ являются результаты эксперимента: зависимость  $\rho_V$  и  $\rho_S$  от температуры при постоянной влажности и 100%-ной, от рекомендуемой по ГОСТ, концентрации рабочего раствора КМ; зависимость  $\rho_V$  и  $\rho_S$  от влажности при постоянной температуре и 75%-ной от рекомендуемой концентрации пропитки сосны.

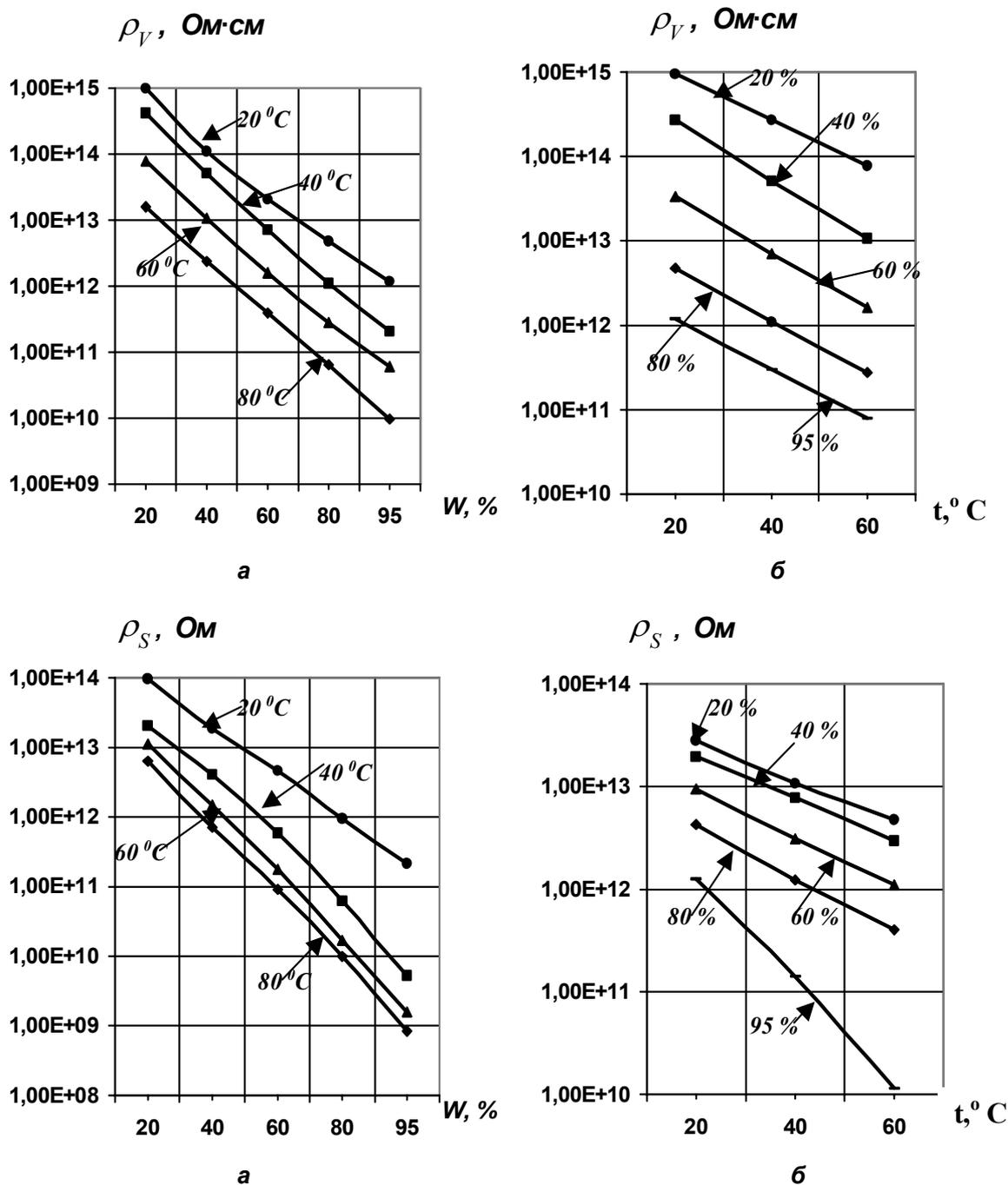


Рис. 23. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина консервирована «КМ» 100%-ной концентрацией рабочего раствора

Зависимости  $\rho_V$  и  $\rho_S$  древесины от влажности при постоянной температуре и от температуры при постоянной влажности и концентрации пропитки препаратом ХМ-11, приведены на рис. 24 ÷ 26.

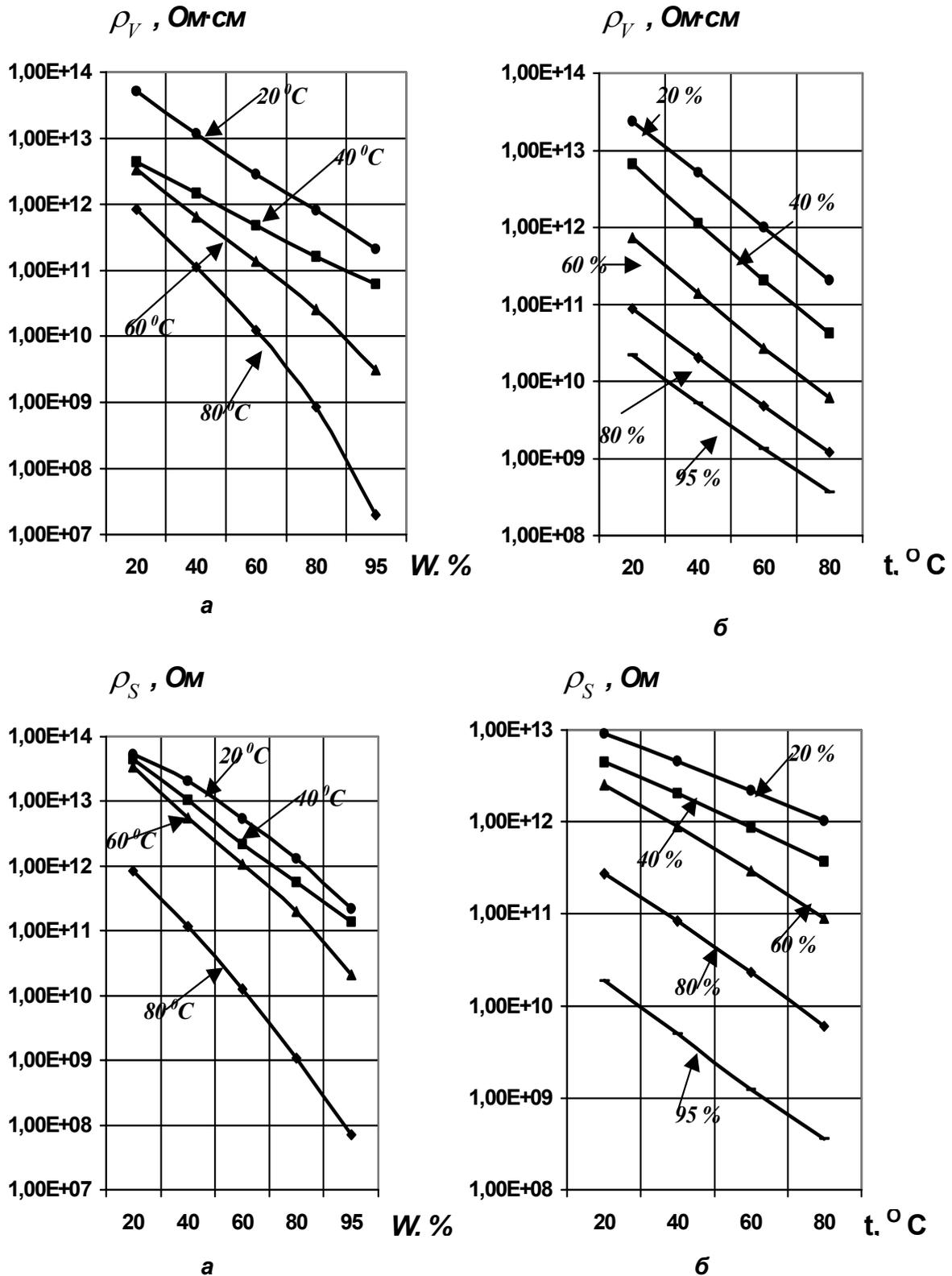


Рис. 24. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина консервирована «ХМ-11» 50%-ной концентрацией рабочего раствора

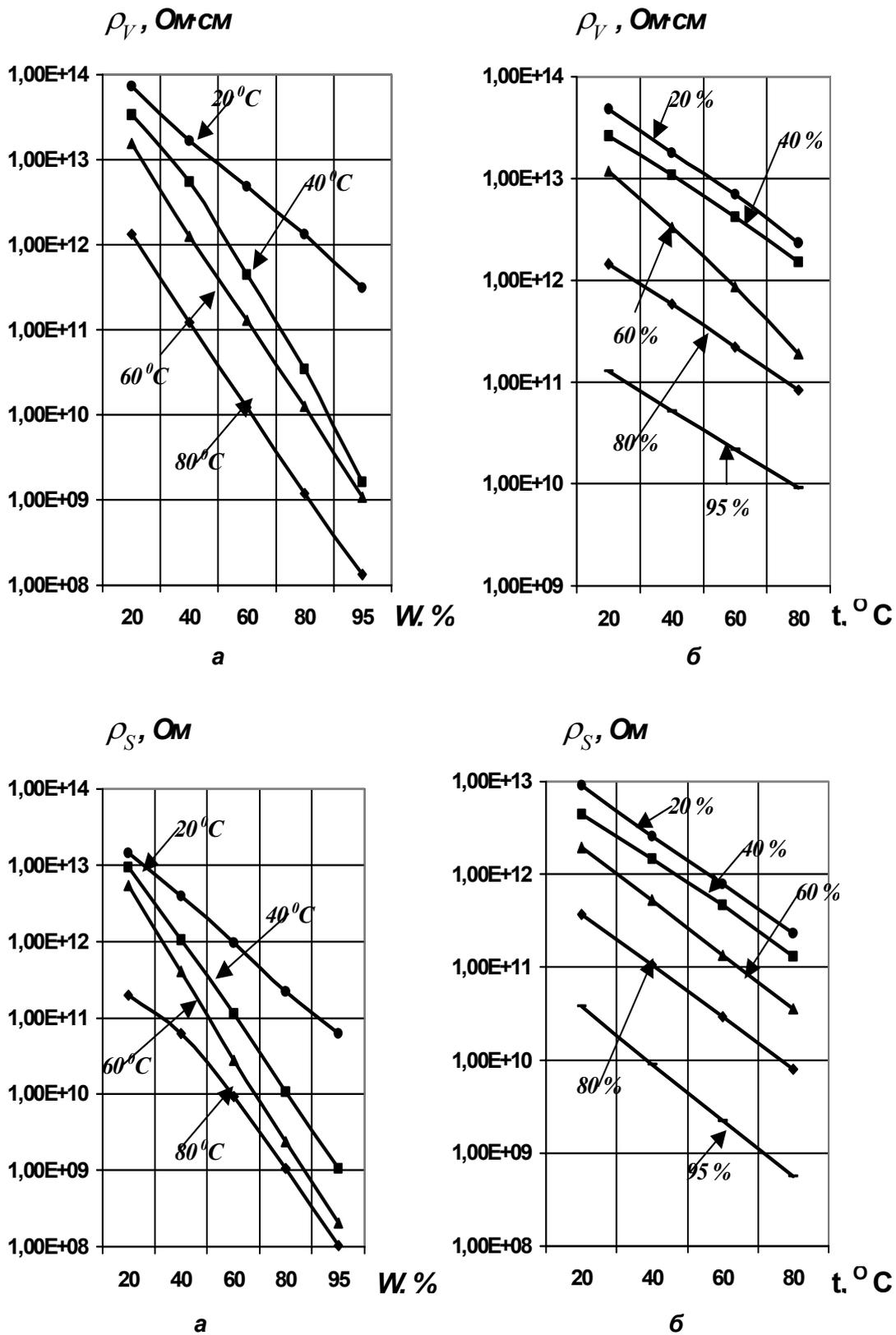


Рис. 25. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина консервирована «ХМ-11» 75%-ной концентрацией рабочего раствора

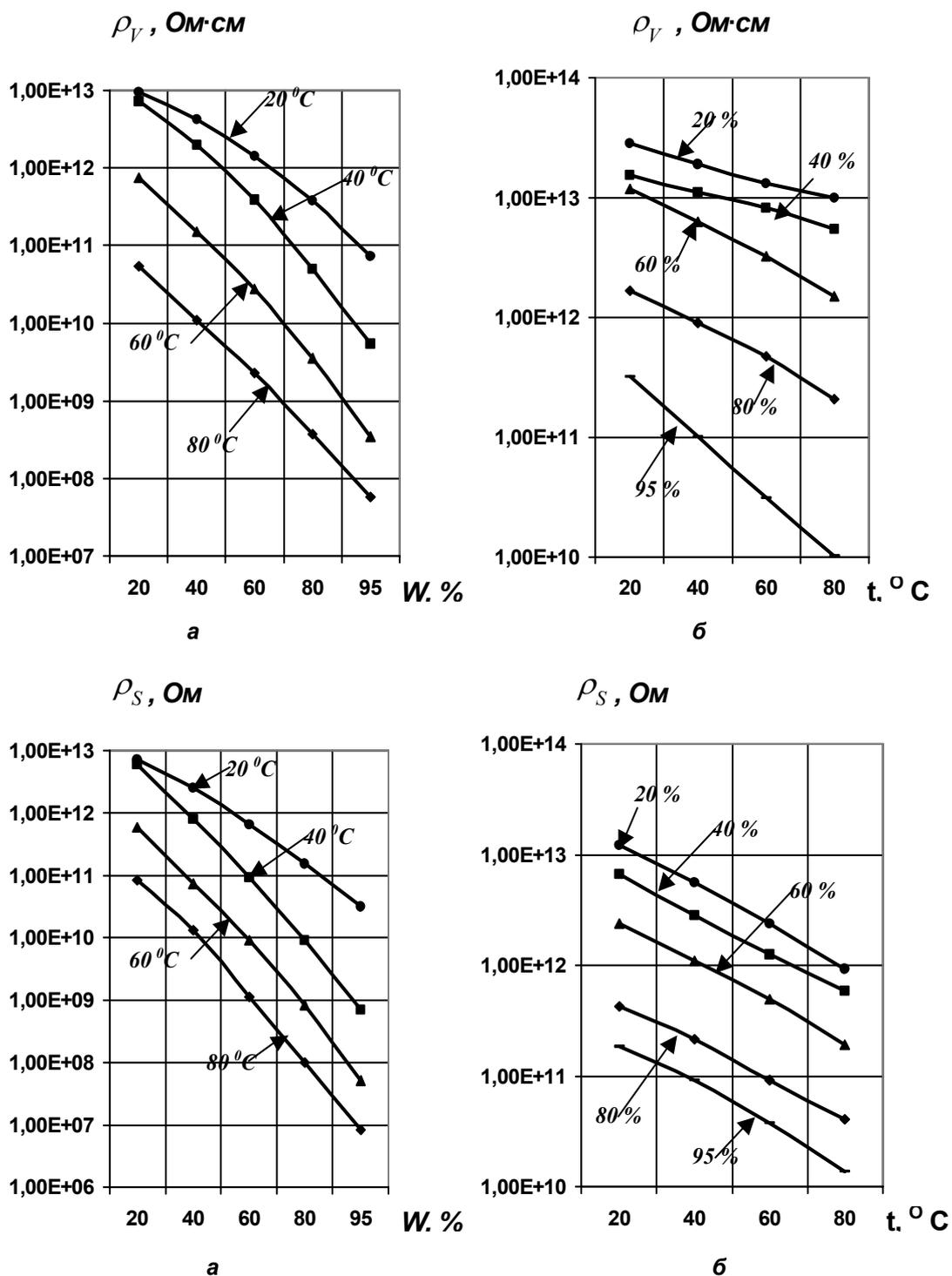


Рис. 26. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина консервирована «ХМ-11» 100% концентрацией рабочего раствора

Анализ зависимостей  $\rho_V=f(t)$  показывает, что в каждой группе образцов, пропитанных ХМ-11, в диапазоне  $20 \div 80^\circ C$  при постоянной влажности величина  $\rho_V$  изменяется в пределах от  $7 \cdot 10^8$  до  $4 \cdot 10^{13}$ , от  $9 \cdot 10^9$  до  $7 \cdot 10^{13}$  и от  $10^{10}$  до  $5 \cdot 10^{13}$  Ом·см, соответственно. Таким образом, разброс зависимостей  $\rho_V=f(t)$  при  $W=const$  лежит в

диапазоне изменения удельного объемного сопротивления от 3,5 до 4,5 порядков.

Высокие значения  $\rho_v$  имеют образцы, пропитанные 100%-ной концентрацией рабочего раствора ХМ-11 при относительной влажности 20 и 40%.

Разброс семейства кривых  $\rho_s=f(T)$  при постоянной влажности лежит в пределах  $5 \cdot 10^8 \div 10^{13}$ ,  $7 \cdot 10^8 \div 10^{13}$  и  $2 \cdot 10^{10} \div 2 \cdot 10^{13}$  Ом при 50, 75 и 100%-ной концентрации пропитки от рекомендуемых концентраций рабочих растворов древесины соответственно. При изучении зависимостей  $\rho_s=f(t)$  при влажности 20 ÷ 80%, которая характерна для условий эксплуатации ВЛ 10 кВ продольного электропитания РЖД, приходим к выводу, что минимальное значение изменения  $\rho_s$  отмечается при пропитке образцов препаратом ХМ-11 100%-ной, от рекомендуемой соответствующим ГОСТ, концентрацией рабочего раствора.

Зависимости  $\rho_v$  и  $\rho_s$  древесины от влажности, постоянной температуры и концентрации пропитки препаратом ХМ-11, приведены на рис. 24, а; 25,а; 26,а.

Анализ этих кривых показывает, что в каждой группе образцов, пропитанных ХМ-11, в диапазоне 20-95% влажности при постоянной температуре величина  $\rho_v$  изменяется в пределах  $3 \cdot 10^7 \div 8 \cdot 10^{13}$ ,  $2 \cdot 10^8 \div 8 \cdot 10^{13}$  и  $7 \cdot 10^7 \div 10^{13}$  Ом·см соответственно. Величина изменения  $\rho_v$  в каждой группе пропитки, в зависимости от постоянной температуры в условиях эксперимента изменяется в пределах 1,6 ÷ 4,2; 1,8 ÷ 3,5 и 2,3 ÷ 3,2 порядков. Ориентируясь на зависимости  $\rho_v=f(W)$ , полученные для 20 ÷ 80% влажности, более или менее отражающие условия эксплуатации древесины ВЛ можно отметить, что величина  $\rho_v$  изменяется в пределах  $10^{12} \dots 8 \cdot 10^{13}$  Ом·см при влажности 20% и  $3 \cdot 10^{10} \div 5 \cdot 10^{12}$  Ом·см при влажности 60% при 50%-ной концентрации от рекомендуемой пропитки.

Разброс семейства кривых  $\rho_s=f(W)$  (рис. 24,а ÷ 26,а) при постоянной температуре и концентрации пропитки лежит в пределах  $9 \cdot 10^7 \div 8 \cdot 10^{13}$ ,  $10^8 \div 3 \cdot 10^{13}$  и  $10^7 \div 8 \cdot 10^{12}$  Ом при 50, 75 и 100%-ной от рекомендуемой концентрации пропитки образцов древесины соответственно.

Анализ зависимостей приведенных на рис. 24 ÷ 26 показывает, что на величины  $\rho_v$  и  $\rho_s$ , пропитанной ХМ-11 древесины, влажность оказывает существенное влияние. Пределы изменения  $\rho_v$  и  $\rho_s$  в диапазоне 20 ÷ 95% влажности значительно больше, чем при изменении температуры и постоянной влажности. Приемлемыми режимами эксплуатации являются: зависимости  $\rho_v$  и  $\rho_s$ : от температуры и постоянной влажности и 100%-ной от рекомендуемой концентрации пропитки рабочего раствора; зависимости  $\rho_v$  и  $\rho_s$  от влажности и по-

стоянной температуры и 50%-ной от рекомендуемой концентрации рабочего раствора пропитки сосны.

Результаты экспериментальных исследований электрического сопротивления древесины сосны, пропитанной препаратом ПХФН, представлены на рис. 27 ÷ 29.

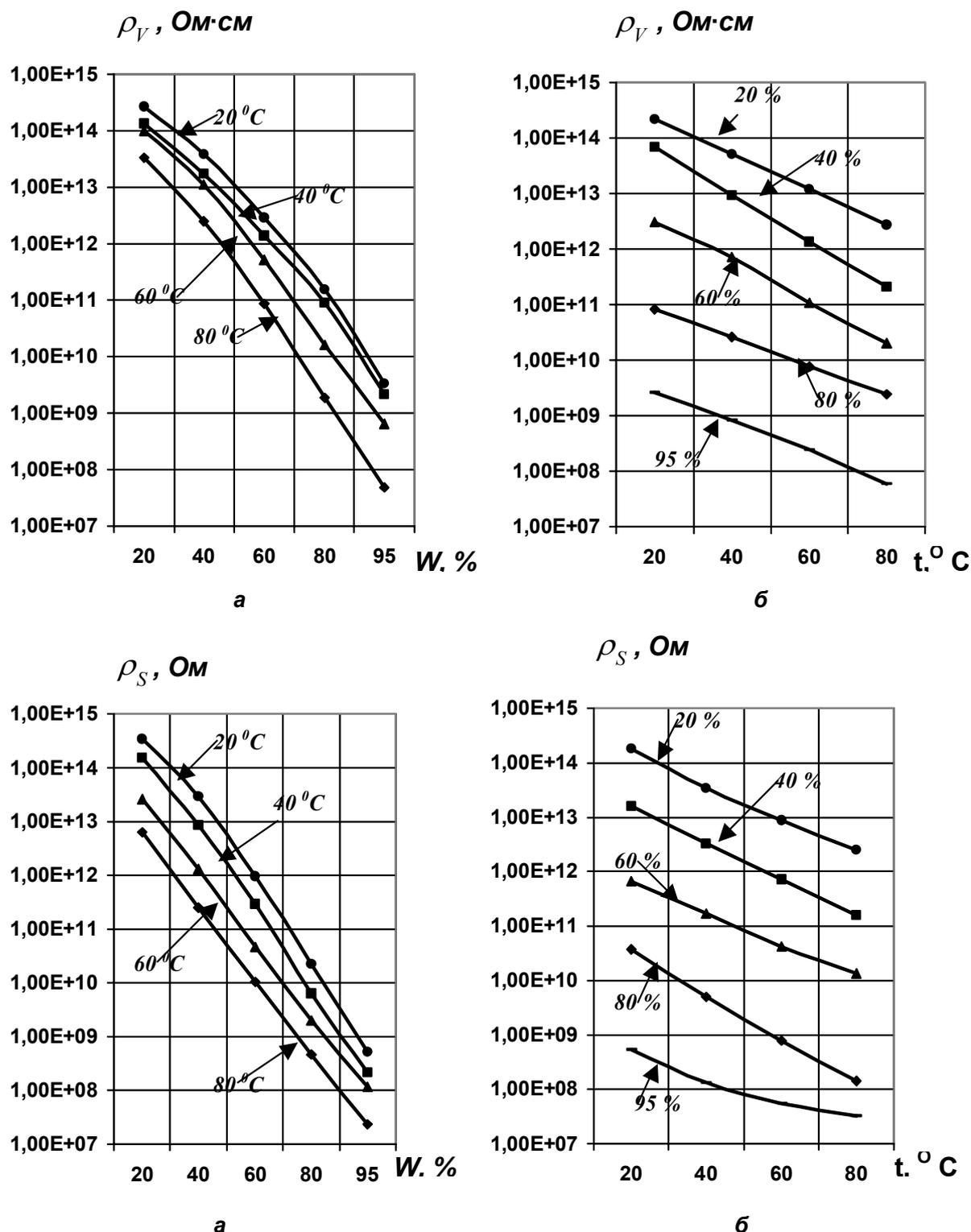


Рис. 27. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина антисептирована «ПХФН» 50% концентрацией рабочего раствора

На этих рисунках приведены зависимости  $\rho_v$  и  $\rho_s$  от влажности при постоянной температуре и от температуры при постоянной влажности и соответствующей пропитке.

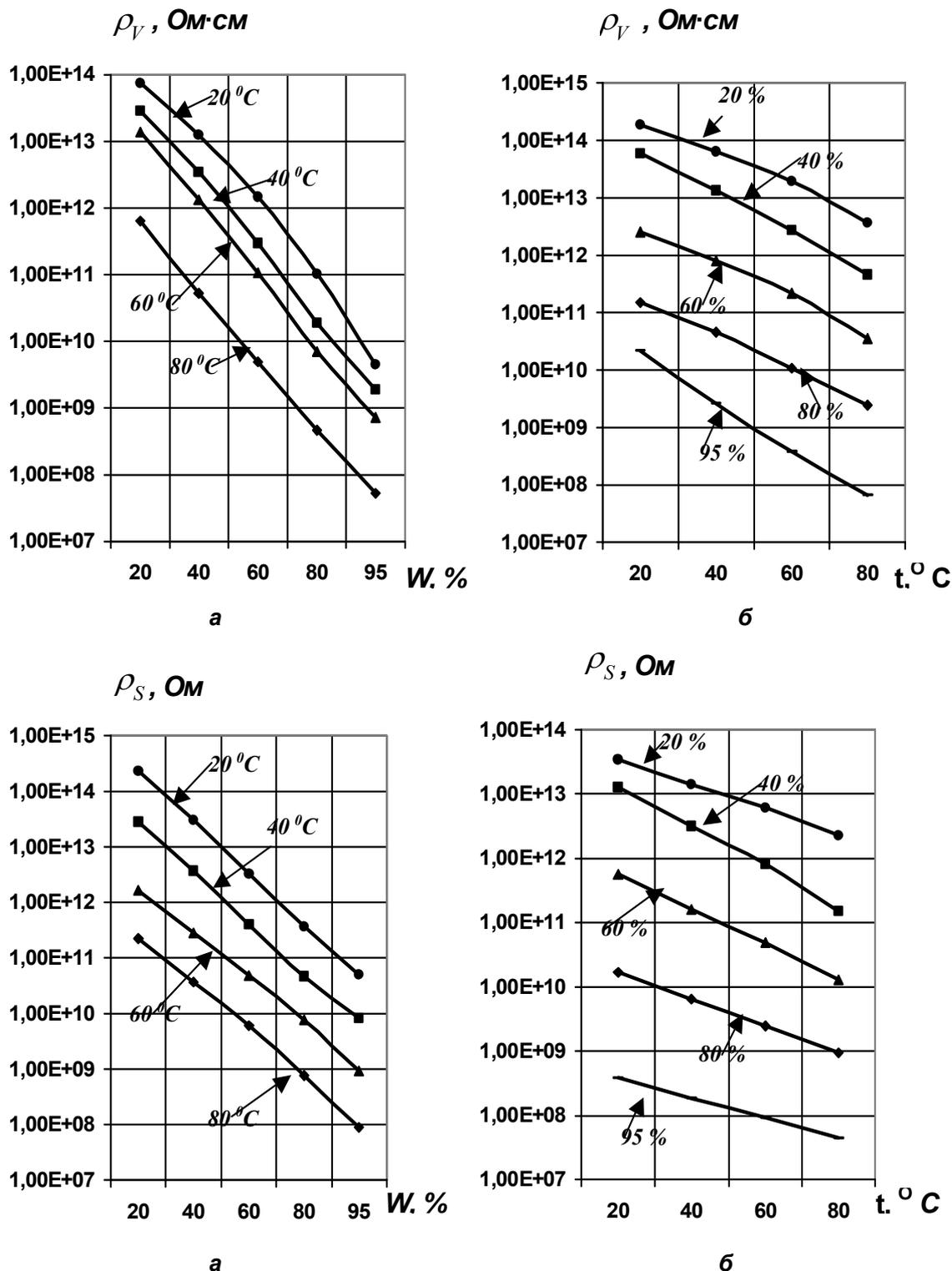


Рис. 28. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина антисептирована «ПХФН» 75% концентрацией рабочего раствора

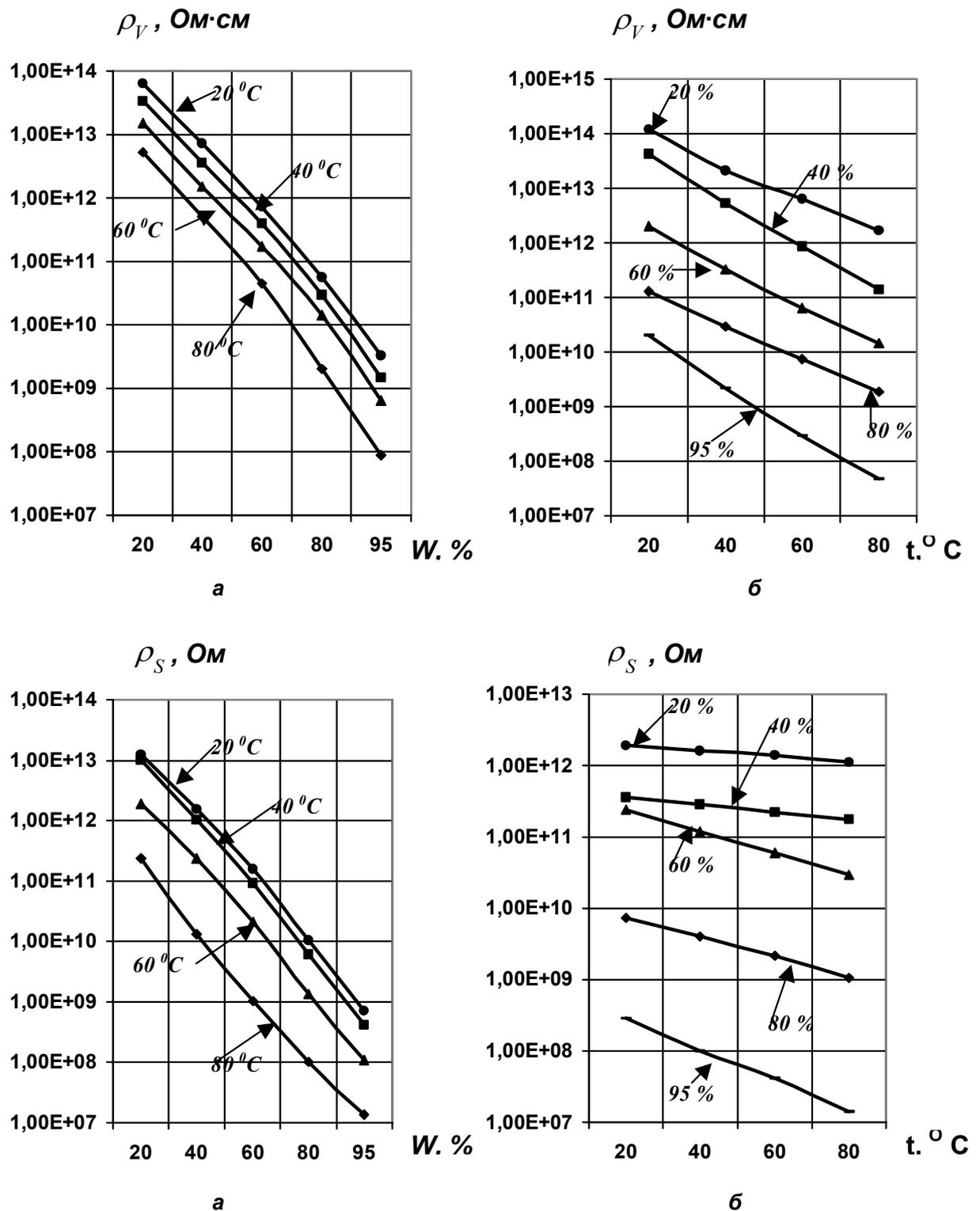


Рис. 29. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина антисептирована «ПХФН» 100% концентрацией рабочего раствора

Анализ зависимостей показывает, что увеличение концентрации пропитки древесины приводит к снижению величины  $\rho_v$  в диапазоне температур  $20 \div 60^\circ\text{C}$  и при постоянной влажности примерно на порядок. Разброс зависимостей  $\rho_v=f(t)$  при постоянной влажности с увеличением концентрации пропитки снижается с пределов  $8 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^{14}$  Ом·см до  $7 \cdot 10^7 \div 10^{14}$  Ом·см, величина  $\rho_v$  в диапазоне температур  $20 \div 60^\circ\text{C}$  в каждой группе пропитки древесины изменяется в пределах порядка и соответствующей влажности среды испытания. Величина  $\rho_s$  также как и величина  $\rho_v$  древесины, зависит от концентрации ее пропитки и от температуры при соответствующей постоянной влажности. Разброс кривых  $\rho_s=f(t)$  при  $W=\text{const}$  с увеличением концентрации пропитки группы образцов сосредоточен в диапазоне  $(5 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^{14}) \div (2 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^{12})$  Ом. Рост концентрации пропитки увеличивает разброс зависимостей  $\rho_s=f(t)$ , по сравнению с рассмотренными ранее кривыми  $\rho_v=f(t)$ .

Анализ зависимостей  $\rho_v$  показывает, что разброс значений  $\rho_v = f(W)$  при  $t=\text{const}$  лежит в пределах  $7 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^{14}$ ,  $7 \cdot 10^7 \div 9 \cdot 10^{13}$ ,  $10^8 \div 8 \cdot 10^{13}$  Ом·см при 50, 75 и 100% от рекомендуемой концентрации пропитки соответственно.

Пределы изменения  $\rho_v$  для каждой группы пропитки составляют в среднем от 1,5 до 2,5 порядков. Пределы изменения величины  $\rho_s$  от влажности при постоянной температуре и соответствующей концентрации пропитки составляют:  $3 \cdot 10^7 \div 7 \cdot 10^{14}$ ,  $8 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^{14}$ ,  $1,1 \cdot 10^7 \div 10^{13}$  Ом. Величина  $\rho_s$  для каждой группы пропитки изменяется в среднем на 1,5 – 2,5 порядка. Наименьшее влияние оказывает влажность на образцы древесины, пропитанные 75% концентрацией рабочего раствора.

Анализ зависимостей приведенных на рис. 27 ÷ 29 показывает, что на величину  $\rho_s$  и  $\rho_v$ , пропитанной ПХФН древесины, температура оказывает большее влияние, чем влажность при равных условиях эксперимента. Приемлемым для эксплуатации древесины ВЛ являются результаты эксперимента: зависимость  $\rho_v$  и  $\rho_s$  от температуры при постоянной влажности и 75%-ной концентрации пропитки ПХФН, зависимость  $\rho_v$  и  $\rho_s$  от влажности при постоянной температуре и 50% концентрации рабочего раствора.

Экспериментальные исследования по определению величины электрического сопротивления древесины сосны пропитанной консервантами КМ, ХМ-11 и антисептиком ПХФН проводились в зависимости от температуры и влажности среды и концентрации пропитки. Образцы древесины пропитывались 50%, 75% и 100%, от рекомендуемой соответствующим ГОСТом, концентрацией рабочего раствора защитных препаратов, в целях исследования влияния кон-

центрации пропитки на величину электрического сопротивления, так как рабочие растворы могут быть различной концентрации. Защитные химические препараты, имея в своей рецептуре одни и те же компоненты, в зависимости от процентного содержания этих компонентом могут применяться как антисептики или консерванты (антисептики и антипирены). При проведенных экспериментальных испытаниях не учитывались защитные свойства пропитанной древесины, которые она приобретает вследствие пропитки, в связи, с чем при дальнейшем изучении электрического сопротивления пропитанной древесины пропитка образцов будет проводиться 100%, от рекомендуемой соответствующим ГОСТом концентрацией рабочего раствора пропитки.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований по определению величины электрического сопротивления древесины, пропитанной фтористыми защитными препаратами – КФА, ФА и ФН, которые представлены на рис. 30 ÷ 32.

На рис. 30 приведены кривые зависимостей  $\rho_v$  и  $\rho_s$ , пропитанной препаратом КФА древесины сосны, от температуры при постоянной влажности и от влажности при постоянной температуре.

Анализ кривых  $\rho_v=f(t)$  при  $W=\text{const}$  показывает, что при изменении температуры в диапазоне 20 ÷ 60°C величина  $\rho_v$  изменяется в пределах от  $10^{10}$  до  $5 \cdot 10^{14}$  Ом·см. При дальнейшем росте температуры с одновременным ростом относительной влажности среды происходит уменьшение величины  $\rho_v$  на два порядка при влажности 95%. Таким образом, разброс зависимостей  $\rho_v=f(t)$  при  $W=\text{const}$  лежит в диапазоне изменения удельного объемного сопротивления от 0,5 до 1,5 порядков.

Величина  $\rho_s$ , также как и величина  $\rho_v$  древесины зависит от температуры при постоянной влажности среды только в большей степени. Так разброс кривых  $\rho_s=f(t)$  при  $W=\text{const}$  сосредоточен в диапазоне  $10^7 \div 7 \cdot 10^{13}$  Ом. В диапазоне температур 20 ÷ 60°C и влажности от 20 ÷ 40% величина  $\rho_v$  и  $\rho_s$  изменяются на одну и ту же величину.

Характер изменения величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$  древесины пропитанной препаратом КФА от влажности при постоянной температуре представлен на рис. 31,а.

Анализ зависимостей  $\rho_v=f(W)$  при  $t=\text{const}$  показывает, что величина  $\rho_v$  изменяется в пределах  $5 \cdot 10^8 \dots 10^{15}$  Ом·см. Пределы изменения  $\rho_s$  при тех же условиях эксперимента составляют  $10^8 \dots 10^{14}$  Ом. Изменение величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$  при различных значениях относительной влажности в среднем составляют от 0,5 до 3 порядков. Можно отметить, что увеличение температуры и влажности приводит к уменьшению величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$ , но при этом температура оказывает большее влияние на электроизоляционные свойства древесины, пропитанной препаратом КФА, чем влажность.

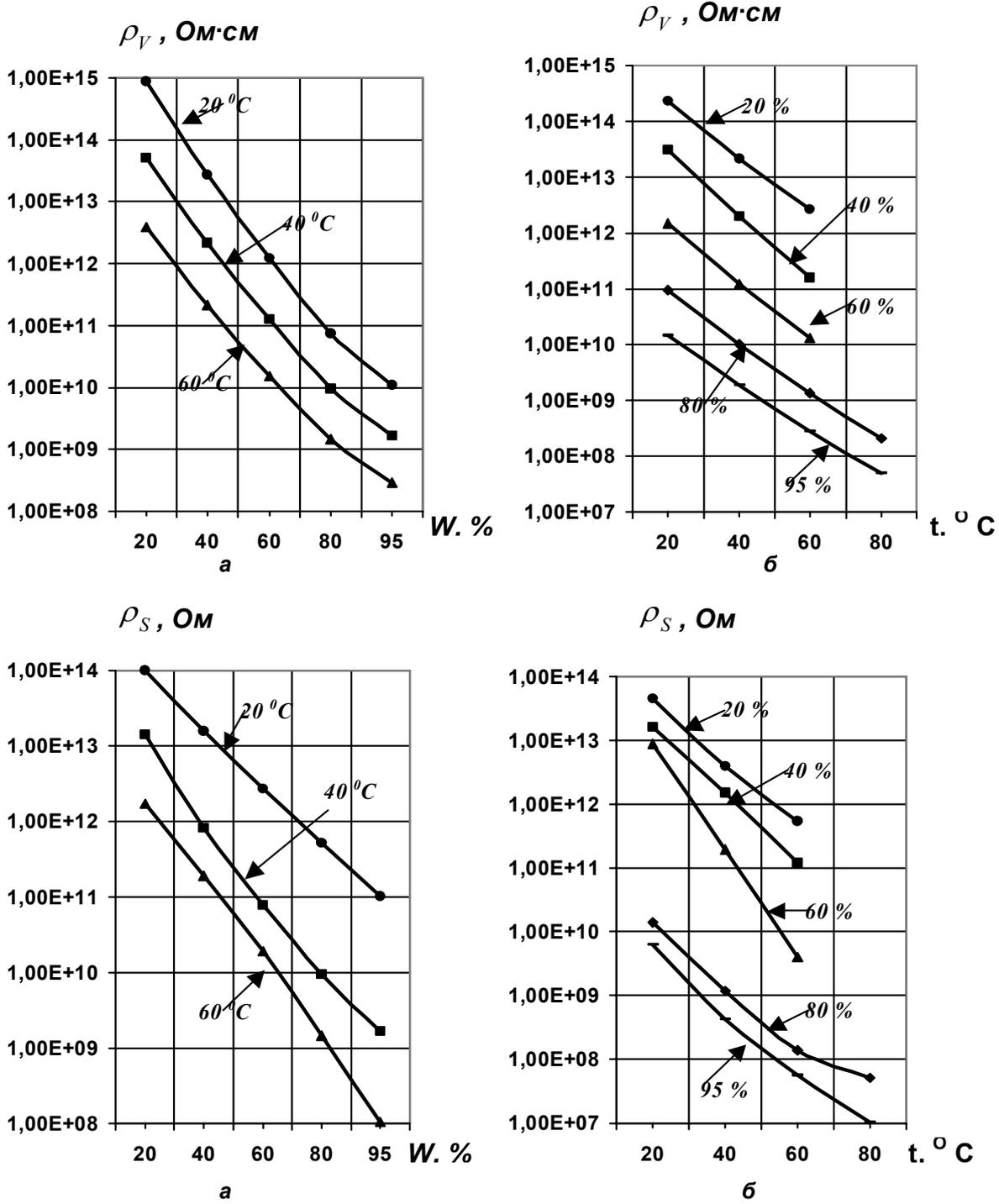


Рис. 30. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина антисептирована «КФА» 100% концентрацией рабочего раствора

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований по определению величины электрического сопротивления древесины, антисептированной препаратом ФА от температуры при постоянной относительной влажности (рис. 31, б) и от влажности при постоянной температуре (рис. 31, а).

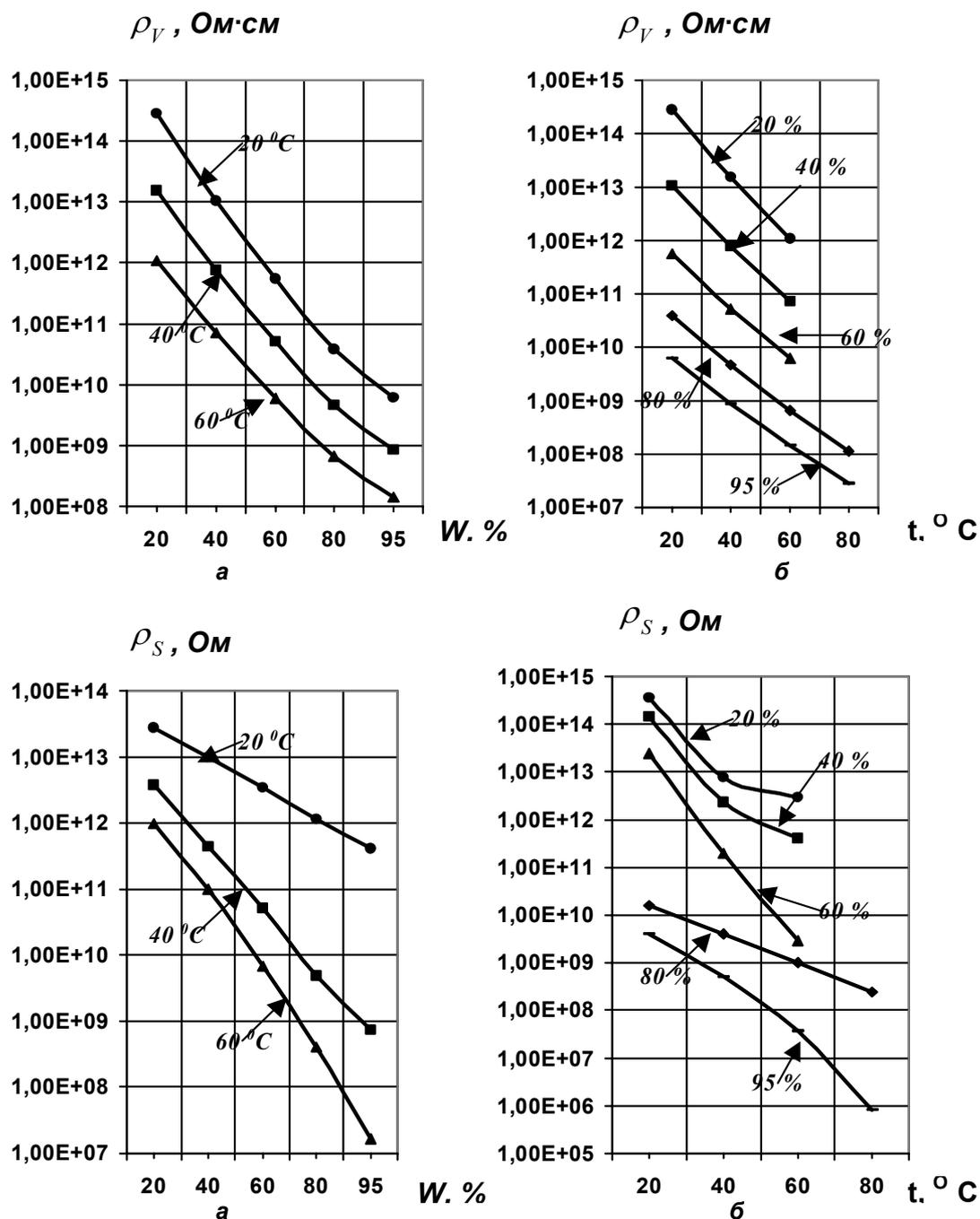


Рис. 31. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина антисептирована «ФА» 100% концентрацией рабочего раствора

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 31, б показывает, что величина  $\rho_v$ , в диапазоне температур  $20 \div 80^\circ\text{C}$  при  $W=\text{const}$  снижается с пределов  $5 \cdot 10^{14}$  до  $5 \cdot 10^7$  Ом·см, а величина  $\rho_s$  изменяется в пределах  $10^6 \dots 6 \cdot 10^{14}$  Ом.

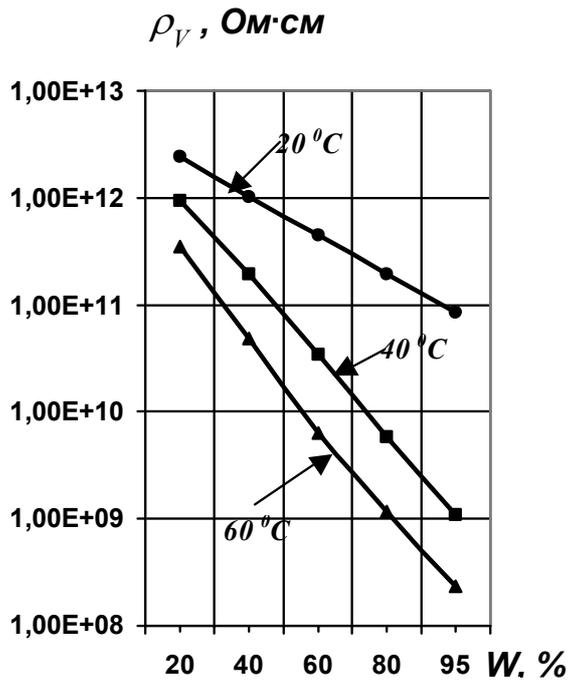
Разброс семейства кривых  $\rho_v=f(W)$  и  $\rho_s=f(W)$  при  $t=\text{const}$  изменяется для  $\rho_v$  в диапазоне  $10^8 \dots 4 \cdot 10^{14}$  Ом·см, а  $\rho_s$  от  $1,5 \cdot 10^8$  до  $5 \cdot 10^{13}$  Ом. Величина  $\rho_v$  и  $\rho_s$  древесины антисептированной препаратом ФА зависит от температуры в большей степени, чем от относительной влажности среды.

Характер зависимости удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны антисептированной препаратом ФН от влажности при постоянной температуре представлены на рис. 32,б и от температуры при постоянной влажности показаны на рис. 32,а.

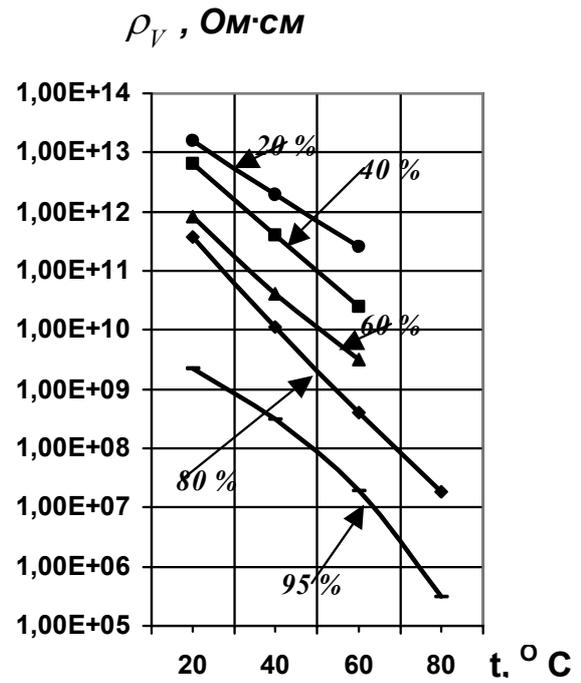
Из графиков видно, что с увеличением температуры и ростом постоянных значений относительной влажности среды испытания величина  $\rho_v$  уменьшается. Причем интенсивное уменьшение величины  $\rho_v$  наблюдается при температуре  $60^\circ\text{C}$  и постоянной относительной влажности 60 % и более. Так для кривой в диапазоне изменения температур от  $20^\circ\text{C} \dots 80^\circ\text{C}$  и влажности 95% разброс значений величины удельного объемного сопротивления составляет 2,5 порядка. Величина  $\rho_v$  при температуре  $40^\circ\text{C}$  и постоянной относительной влажности среды испытания 80 % составляет  $10^{10}$  Ом·см, а при тех же условиях, т.е. при влажности 80 % и постоянной температуре  $40^\circ\text{C}$  -  $6 \cdot 10^9$  Ом·см. При увеличении влажности до 95 % величина  $\rho_v$  уменьшается до  $10^9$ . Разброс значений  $\rho_s=f(t)$  при  $W=\text{const}$  сосредоточен в диапазоне  $9 \cdot 10^6 \dots 9 \cdot 10^{13}$  Ом. Диапазон изменения семейства кривых  $\rho_v=f(W)$  при  $t=\text{const}$  находится в пределах  $5 \cdot 10^8 \dots 4 \cdot 10^{12}$  Ом·см, а для кривых  $\rho_s=f(W)$  при  $t=\text{const}$  -  $2 \cdot 10^8 \dots 9 \cdot 10^{12}$  Ом. Пределы изменения  $\rho_v$  и  $\rho_s$  в диапазоне  $20 \div 95\%$  относительной влажности и постоянной температуре больше, чем при изменении температуры и постоянной влажности. Приемлемыми режимами эксплуатации являются: зависимости  $\rho_v$  и  $\rho_s$  от влажности и постоянной температуре.

На рис. 33-35 представлены зависимости удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления древесины пропитанной защитными препаратами КМ, ХМ-11, ПХФН от низких температур.

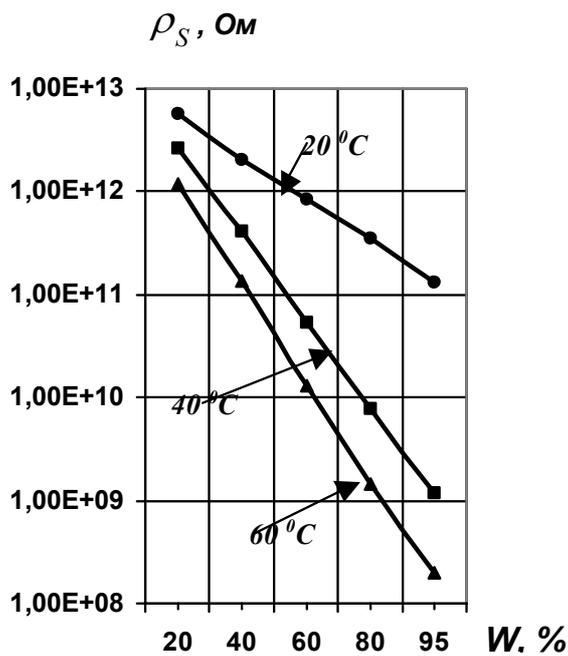
Анализ полученных кривых показывает, что характер изменения кривых такой же, как и у натуральной древесины при минусовых температурах (рис. 16).



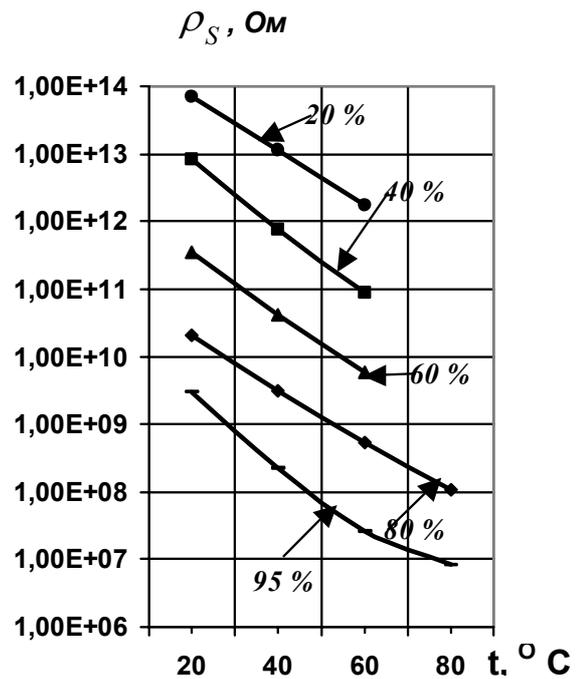
a



б



a



б

Рис. 32. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны от влажности при постоянной температуре (а) и от температуры при постоянной влажности (б). Древесина антисептирована «ФН» 100% концентрацией рабочего раствора

В диапазоне изменения температуры от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  значения  $\rho_v$  и  $\rho_s$  почти линейно возрастают. В этом диапазоне температур величина удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления древесины возрастают в пределах одного порядка. Величина удельного объемного сопротивления древесины пропитанной препаратом КМ (рис. 33) изменяется в диапазоне от  $6,5 \cdot 10^{14}$  до  $7 \cdot 10^{15}$  Ом·см, а  $\rho_s$  в диапазоне  $2,5 \cdot 10^{14} \dots 2,4 \cdot 10^{15}$  Ом. Кривые, выражающие зависимость сопротивления от температуры, почти параллельны между собой. При температуре  $-10^{\circ}\text{C}$  разность значений  $\rho_v$  и  $\rho_s$  составляет около половины порядка. Вероятно, что при дальнейшем понижении температуры  $\rho_v$  и  $\rho_s$  сравняются.

Характер изменения сопротивления от температуры для древесины консервированной защитным препаратом ХМ-11 (рис 34) повторяет изменения кривых рис. 33. Величина удельного объемного сопротивления (рис. 34) при изменении температуры от  $0 \div -10^{\circ}\text{C}$  изменяется в диапазоне  $7 \cdot 10^{13} \dots 5,5 \cdot 10^{14}$  Ом·см, а величина удельного поверхностного сопротивления древесины при тех же условиях эксперимента изменяется от  $5 \cdot 10^{13}$  до  $5,1 \cdot 10^{14}$  Ом. Рост величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$  при дальнейшем уменьшении температуры приведет к тому, что величины сопротивлений станут одинаковыми.

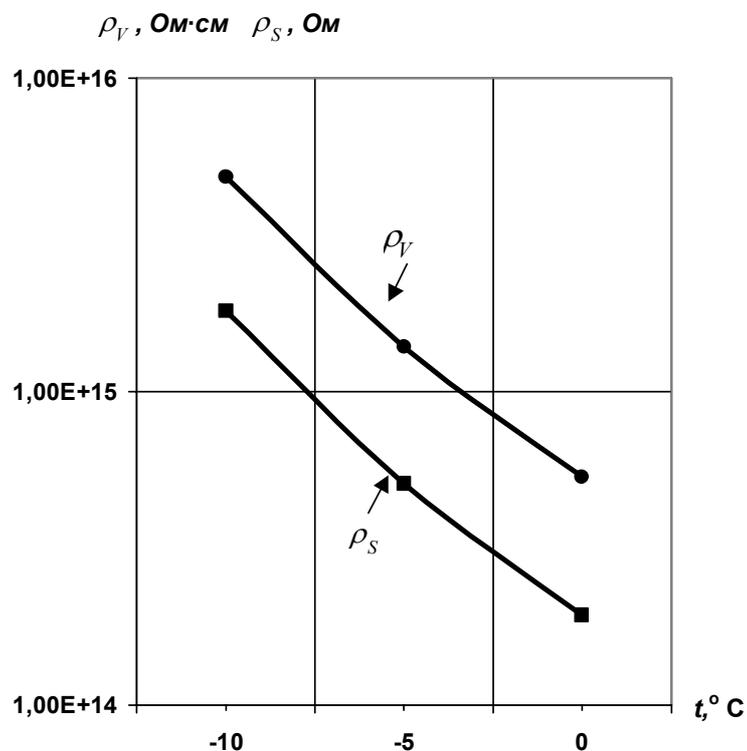


Рис. 33. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах. Древесина консервирована «КМ»

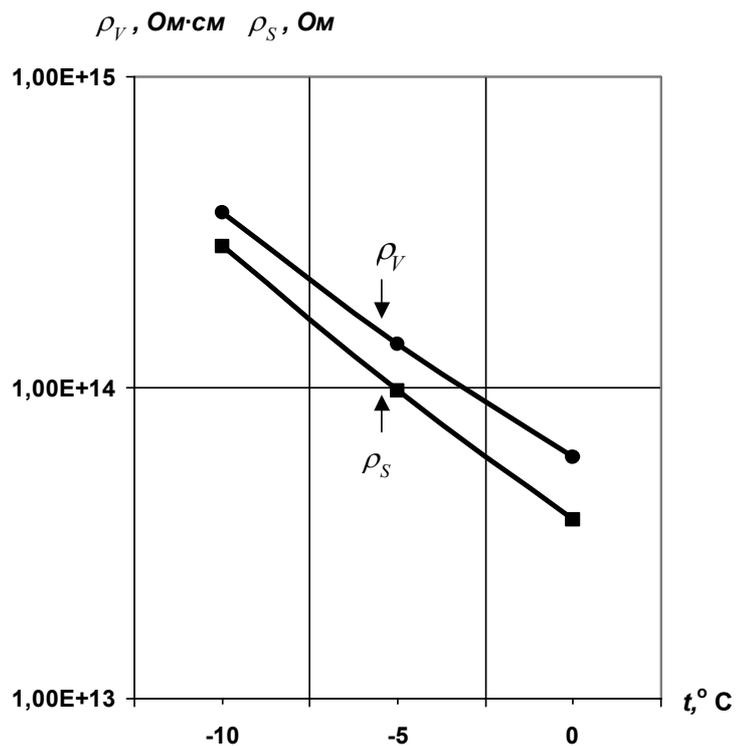


Рис. 34. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах. Древесина консервирована «ХМ-11»

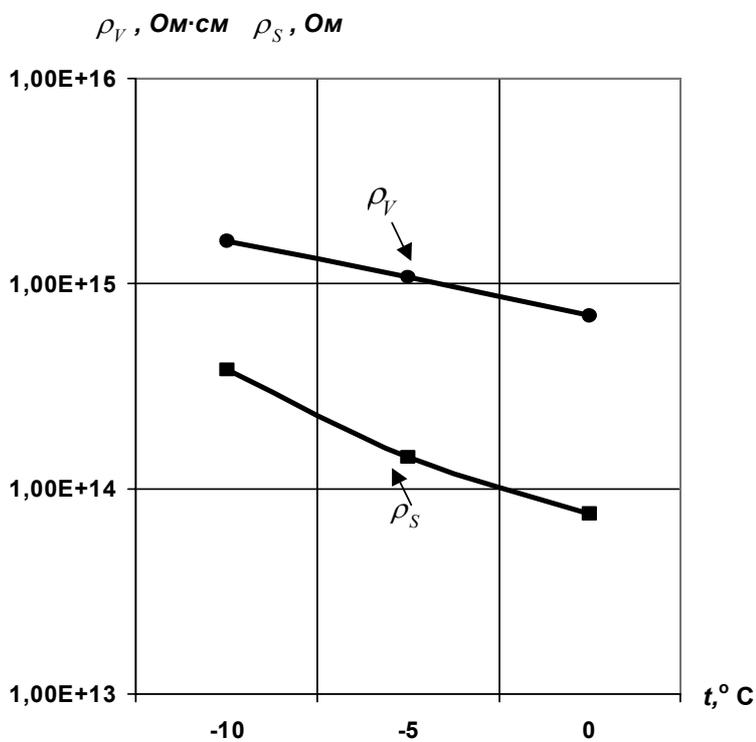


Рис. 35. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах. Древесина антисептирована «ПХФН»

Изменение величины сопротивления древесины, пропитанной антисептиком ПХФН, от низких температур представлено на рис. 35 показывает, что с ростом отрицательных температур величина  $\rho_v$  и  $\rho_s$  растет. В диапазоне температур от 0°C до -10°C величина  $\rho_v$  изменяется от  $9 \cdot 10^{14}$  до  $2 \cdot 10^{15}$  Ом·см, а значения  $\rho_s$  возрастают в пределах одного порядка от  $9 \cdot 10^{13}$  до  $5,7 \cdot 10^{14}$  Ом.

Характер зависимости удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны антисептированной препаратами КФА, ФА и ФН от низких температур представлены на рис. 36-38.

В диапазоне изменения температур от 0 до -10°C почти линейно возрастают значения  $\rho_v$  и  $\rho_s$ . При указанном диапазоне температур величина  $\rho_v$  для образцов антисептированных препаратом КФА изменяется в пределах от  $9,2 \cdot 10^{14}$  до  $2,4 \cdot 10^{15}$  Ом·см; для антисептика ФА –  $7,5 \cdot 10^{14} \dots 3,1 \cdot 10^{15}$  Ом·см; для ФН –  $9,3 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{15}$  Ом·см. Величина удельного поверхностного сопротивления древесины сосны антисептированной препаратами КФА, ФА и ФН при тех же условиях испытания изменяется в диапазоне  $9,6 \cdot 10^{13} \div 6 \cdot 10^{14}$ ;  $5,1 \cdot 10^{14} \div 10^{15}$ ;  $8,7 \cdot 10^{13} \div 6,2 \cdot 10^{14}$  соответственно.

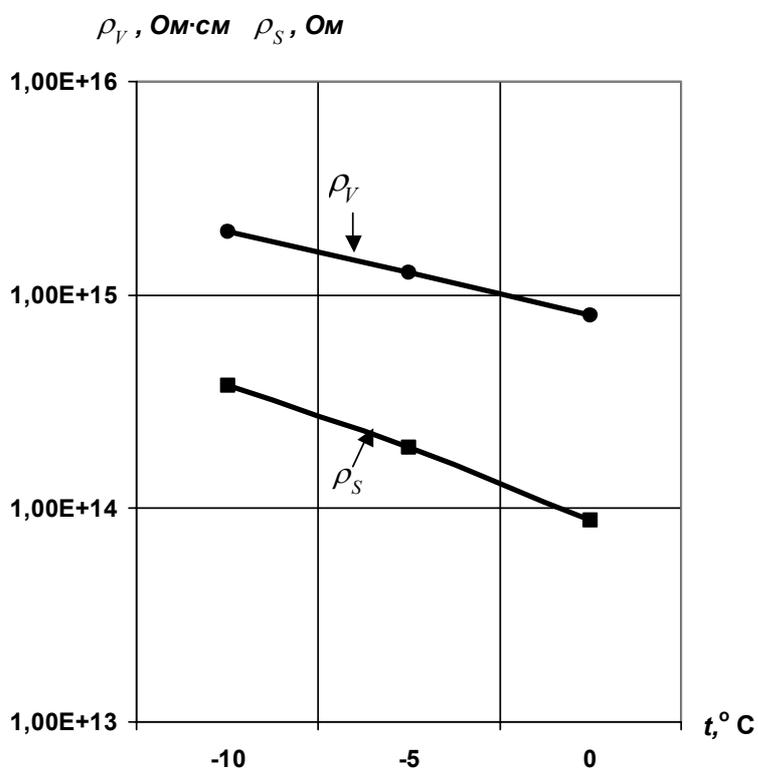


Рис. 36. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах. Древесина антисептирована «КФА»

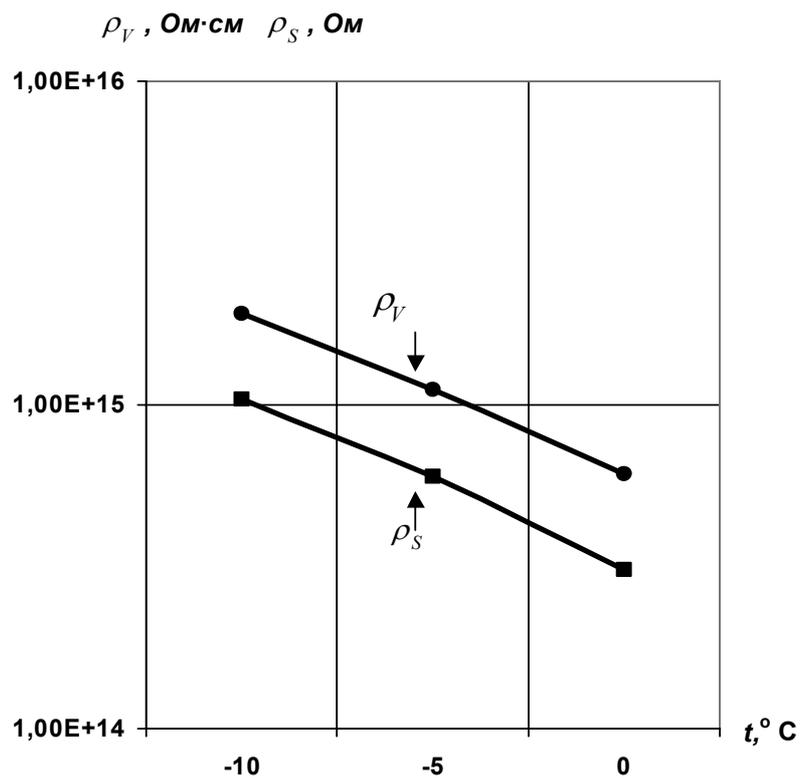


Рис. 37. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах. Древесина антисептирована «ФА»

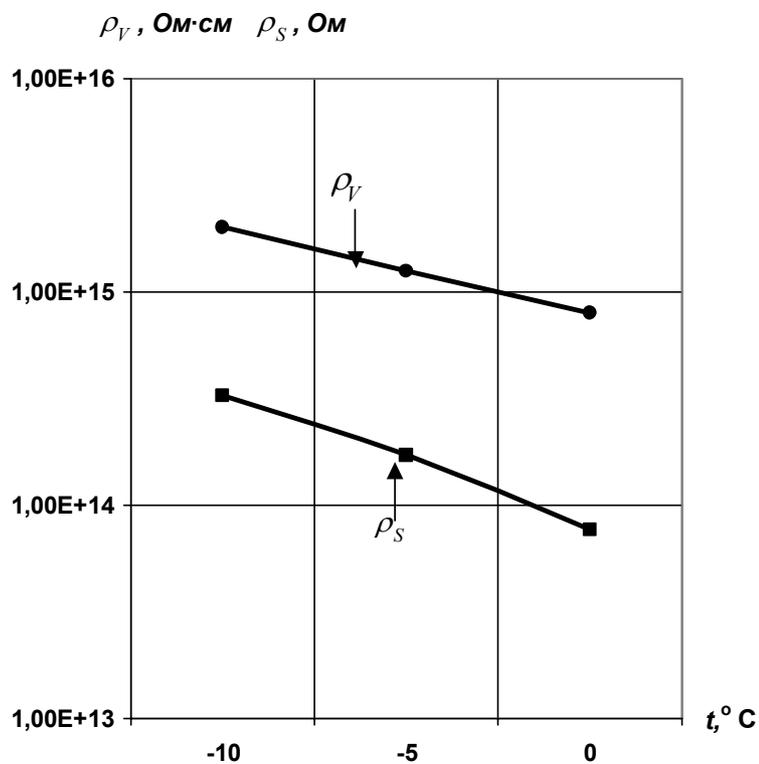


Рис. 38. Зависимость удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах. Древесина антисептирована «ФН»

Кривые, представленные на рис. 36-38, выражающие зависимости удельных объемных и удельных поверхностных сопротивлений древесины сосны при низких температурах сближаются между собой. Разность значений  $\rho_v$  и  $\rho_s$  составляет около половины порядка. Изменение величин  $\rho_v$  и  $\rho_s$  при температуре  $-10^\circ\text{C}$  в среднем составляют от половины до порядка. При дальнейшем уменьшении температуры, и принимая во внимание характер кривых представленных на рис. 16, можно предположить, что значения  $\rho_v$  и  $\rho_s$  станут равными.

По результатам комплексных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Электрическое сопротивление сосны пропитанной КМ зависит от влажности в большей степени, чем при тех же условиях от температуры. С ростом концентрации эта зависимость уменьшается.
2. Электрическое сопротивление сосны, пропитанной ПХФН, уступает значениям электрического сопротивления сосны, пропитанной КМ, но значительно лучше, чем при тех же условиях электрические характеристики древесины, пропитанной ХМ-11 и натуральной древесины сосны.
3. Электрическое сопротивление сосны антисептированной ФА уступает значениям электрического сопротивления древесины, пропитанной антисептиком КФА, но обладает лучшими электрическими свойствами, чем образцы древесины антисептированной препаратом ФН.
4. Антисептик КФА придает древесине наилучшие электроизоляционные свойства по сравнению с антисептиком ПХФН и консервантом ХМ-11, но уступает консерванту КМ.
5. Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что пропитка древесины защитными химическими препаратами КМ, ХМ-11, ПХФН, КФА, ФА и ФН при отрицательных температурах способствует увеличению электрического сопротивления древесины по сравнению с натуральной древесиной.
6. Величина электрического сопротивления сосны консервированной защитным препаратом ХМ-11, при низких температурах имеет меньшие значения, чем образцы древесины, консервированной препаратом КМ, антисептиком ПХФН и фторсодержащими химическими защитными препаратами КФА, ФА и ФН.

#### 4. РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАТУРАЛЬНОЙ И ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ УЗЛА «ФАРФОР-ДЕРЕВО» КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

##### 4.1. Метод определения электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины сосны, при равновесных условиях

Результаты экспериментальных исследований по определению электрического равновесного сопротивления древесины в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха, а также от вида и концентрации химической пропитки показывают существенную нелинейность таких связей (рис. 16 ÷ 44, П.2.1 - П.2.18).

В начале, как правило, с ростом указанных факторов происходит убывание сопротивления; затем сопротивление, достигнув некоторого минимума, начинает возрастать.

Представим зависимость сопротивления  $R$  от этих факторов в виде

$$R = f(Q, W, t), \quad (41)$$

где  $Q$  - величина (процент) пропитки древесины соответствующим препаратом;  $W$  - относительная влажность воздуха;  $t$  - его температура.

Поскольку сопротивление при изменении указанных величин меняется на несколько порядков, то имеет смысл при выводе связей рассматривать его логарифм (натуральный). Опыты по измерению сопротивления проводились либо при фиксированных, но для каждой серии различных значениях пропитки  $Q$  и влажности  $W$  с изменением температуры воздуха  $t$ , либо при фиксированных  $Q$  и  $t$  с изменением влажности воздуха  $W$ .

Качественно указанные зависимости легче всего представить в дифференциальной форме.

Пусть  $Y$  - натуральный логарифм сопротивления ( $Y = \ln(R)$ ), а  $t$ , к примеру, - одно из указанных переменных в серии факторов, влияющих на величину сопротивления. Тогда искомую связь в дифференциальной форме можно представить следующим образом

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -(at + b) \cdot (c - t), \quad (42)$$

где  $a$ ,  $b$ , и  $c$  - параметры, причем, как видим, параметр  $c$  представляет значение влияющего фактора  $t$ , при котором логарифм сопротивления имеет минимум.

Для влажности  $W$  можно записать

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = -(\alpha W + \beta)(\gamma - W). \quad (43)$$

Влияние пропитки древесины на логарифм сопротивления описывается также выражениями типа (42) и (43)

$$\frac{\partial Y}{\partial Q} = -(\lambda_0 Q + \lambda_1)(\lambda_2 - Q). \quad (44)$$

В этих уравнениях  $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  - параметры (постоянные величины).

Перейдем к нахождению  $Y$ . Из (42) следует

$$Y = C_1(Q, W) - \int (at + b)(c - t)dt, \quad (45)$$

где  $C_1(Q, W)$  - некоторая функция от величины пропитки  $Q$  и влажности воздуха  $W$ .

Проинтегрировав (45), найдем

$$Y = C_1(Q, W) - bct - \frac{1}{2}(ac - b)t^2 + \frac{a}{3}t^3. \quad (46)$$

Обозначим

$$B_1 = -bc; B_2 = -\frac{1}{2}(ac - b); B_3 = \frac{a}{3},$$

тогда

$$Y = \ln R = C_1(Q, W) + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3. \quad (47)$$

Подставив (47) в (43), получим

$$\frac{\partial C_1(Q, W)}{\partial W} = -(\alpha W + \beta)(\gamma - W). \quad (48)$$

Проведя решение, аналогичное (45) и (46), получим

$$C_1(Q, W) = C_2(Q) + A_1 W + A_2 W^2 + A_3 W^3, \quad (49)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  - постоянные параметры.

Подставим (49) в (47)

$$Y = C_2(Q) + A_1 W + A_2 W^2 + A_3 W^3 + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3. \quad (50)$$

Наконец, подставив (50) в (44), получим

$$\frac{\partial C_2}{\partial Q} = -(\lambda_0 Q + \lambda_1)(\lambda_2 - Q) \quad (51)$$

и

$$C_2(Q) = \alpha_0 + \alpha_1 Q + \alpha_2 Q^2 + \alpha_3 Q^3, \quad (52)$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - константы.

Подставим  $C_2(Q)$  в (50)

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 Q + \alpha_2 Q^2 + \alpha_3 Q^3 + A_1 W + A_2 W^2 + A_3 W^3 + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3. \quad (53)$$

Это есть общее выражение для логарифма сопротивления в зависимости от пропитки  $Q$ , относительной влажности воздуха  $W$  и его температуры  $t$ . Само же сопротивление выразится следующим равенством

$$R(Q, W, t) = R_0 \exp \left\{ \left( \alpha_1 Q + \alpha_2 Q^2 + \alpha_3 Q^3 \right) + \left( A_1 W + A_2 W^2 + A_3 W^3 \right) + \left( B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3 \right) \right\}, \quad (54)$$

где

$$R_0 = \exp(\alpha_0). \quad (55)$$

Из (54) следует, что сопротивление древесины может быть выражено произведением трех функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента

$$R(Q, W, t) = f(Q) \cdot f(W) \cdot f(t), \quad (56)$$

где

$$f_1(Q) = R_0 \exp\{\alpha_1 Q + \alpha_2 Q^2 + \alpha_3 Q^3\}, \quad (57)$$

$$f_2(W) = \exp\{A_1 W + A_2 W^2 + A_3 W^3\}, \quad (58)$$

$$f_3(t) = \exp\{B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3\}. \quad (59)$$

По экспериментальным данным о влиянии температуры и относительной влажности воздуха, а также качества и степени пропитки на сопротивление древесины сосны определены параметры экспериментальных зависимостей для удельного электрического сопротивления древесины. Их значения приведены в табл. 7 ÷ 16.

Таблица 7

Параметры удельного объемного сопротивления -  $\rho_v$  Ом·см, пропитка - КМ

Q	0	0,50	0,75	1,00	Среднее
$C_2$	28,97	37,32	35,57	35,10	
$A_1$	-4,09	-6,54	-4,39	-3,44	-4,62
$A_2$	6,34	5,73	3,32	1,24	4,16
$A_3$	-7,82	-7,05	-4,10	-1,55	-5,13
$B_1 \cdot 10^2$	-4,96	-6,22	-5,36	-6,12	-3,39
$B_2 \cdot 10^4$	1,46	-3,17	-5,34	-6,52	3,49
$B_3 \cdot 10^6$	-1,93	3,36	5,64	6,88	-1,29

$$C_2(Q) = 29,18 + 11,71Q + 14,43Q^2 - 20,86Q^3. \quad (60)$$

Таблица 8

Параметры удельного объемного сопротивления -  $\rho_v$  Ом·см, пропитка - ХМ - 11

Q	0	0,50	0,75	1,00	Среднее
$C_2$	28,97	34,79	33,45	32,57	
$A_1$	-4,09	-6,63	-4,61	-3,34	-4,67
$A_2$	6,34	6,38	12,03	8,10	8,21
$A_3$	-7,82	-7,85	-14,89	-10,02	-10,15
$B_1 \cdot 10^2$	-4,96	-4,86	-5,30	-3,72	-4,71
$B_2 \cdot 10^4$	1,46	-2,42	-1,05	-1,22	-0,81
$B_3 \cdot 10^6$	-1,93	2,56	1,11	1,28	0,76

$$C_2(Q) = 29,12 + 8,01Q + 11,35Q^2 - 16,35Q^3. \quad (61)$$

Таблица 9

**Параметры удельного объемного сопротивления -  $\rho_v$  Ом·см,  
пропитка - ПХФН**

Q	0	0,50	0,75	1,00	Среднее
$C_2$	33.074	33,80	33,81	33,15	
$A_1$	-	-11,41	-11,34	-8,75	-10,50
$A_2$	-	16,36	11,92	15,04	14,44
$A_3$	-	-20,24	-14,76	-18,57	-17,85
$B_1 \cdot 10^2$	-	-4,12	-3,72	-3,18	-3,67
$B_2 \cdot 10^4$	-	-0,38	1,16	0,67	0,483
$B_3 \cdot 10^6$	-	0,42	-1,21	0,70	-0,497

$$C_2(Q) = 33,074 + 1,079Q + 2,484Q^2 - 3,49Q^3. \quad (62)$$

Таблица 10

**Параметры удельного поверхностного сопротивления -  $\rho_s$  Ом,  
пропитка - КМ**

Q	0	0,50	0,75	1,00	Среднее
$C_2$	29,83	35,62	33,49	33,80	
$A_1$	-3,56	-6,94	-3,65	-5,00	-4,79
$A_2$	14,20	6,71	5,46	-6,02	5,09
$A_3$	-17,52	-8,26	-6,75	7,36	-6,29
$B_1 \cdot 10^2$	-3,40	-6,38	-5,22	-5,50	-5,13
$B_2 \cdot 10^4$	-6,72	-3,75	-2,14	-4,16	-4,19
$B_3 \cdot 10^6$	7,86	3,92	2,25	4,48	4,62

$$C_2(Q) = 30,03 + 7,48Q + 9,29Q^2 - 13,62Q^3. \quad (63)$$

Таблица 11

**Параметры удельного поверхностного сопротивления -  $\rho_s$  Ом,  
пропитка - ХМ-11**

Q	0	0,50	0,75	1,00	Среднее
$C_2$	29,83	32,12	32,58	33,17	
$A_1$	-3,56	-5,73	-5,65	-6,52	-5,37
$A_2$	14,20	9,76	6,84	-0,32	7,62
$A_3$	-17,52	-12,04	-8,43	0,39	-9,40
$B_1 \cdot 10^2$	-3,40	-4,90	-5,88	-4,00	-4,55
$B_2 \cdot 10^4$	-6,72	-2,84	-2,69	-0,37	-3,16
$B_3 \cdot 10^6$	7,86	3,01	2,81	0,40	3,52

$$C_2(Q) = 29,85 + 4,00Q + 1,71Q^2 - 2,47Q^3. \quad (64)$$

Таблица 12

Параметры удельного поверхностного сопротивления -  $\rho_s$  Ом,  
пропитка - ПХФН

Q	0	0,50	0,75	1,00	Среднее
$C_2$	38,73	-6,14	-1,25	1,753	
$A_1$	-	-12,39	-9,39	-9,03	-10,42
$A_2$	-	18,39	14,47	9,30	14,05
$A_3$	-	-22,78	-17,87	-11,49	-17,41
$B_1 \cdot 10^2$	-	-5,22	-3,83	-3,44	-4,16
$B_2 \cdot 10^4$	-	3,07	0,48	0,65	1,40
$B_3 \cdot 10^6$	-	-3,25	-0,54	-0,70	-1,50

$$C_2(Q) = 38,73 - 6,142Q - 1,25Q^2 + 1,753Q^3. \quad (65)$$

Таблица 13

Параметры удельного объемного  $\rho_v$  и удельного поверхностного  $\rho_s$   
сопротивления натуральной древесины сосны, Ом (для  $Q = 0$ )

Вид	Rv	Rs	вид	Rv	Rs
$C_2$	26,72	27,94	$B_1 \cdot 10^2$	-4,97	-4,83
$A_1$	-3,37	-6,56	$B_2 \cdot 10^4$	-10,15	-10,80
$A_2$	5,00	16,10	$B_3 \cdot 10^6$	11,18	13,20
$A_3$	-6,83	-22,23			

Таблица 14

Параметры удельного объемного  $\rho_v$ , Ом·см  
и удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$ , Ом.  
Пропитка КФА (для  $Q = 1$ )

Вид	$\rho_v$	$\rho_s$	вид	$\rho_v$	$\rho_s$
$C_2$	39,694	39,898	$B_1$	-0,061	-0,171
$A_1$	-17,675	-18,346	$B_2 \cdot 10^{-3}$	-1,396	-0,469
$A_2$	5,198	15,301	$B_3 \cdot 10^{-5}$	1,037	0,155
$A_3$	-1,196	-9,435			

Таблица 15

Параметры удельного объемного  $\rho_v$ , Ом·см и удельного  
поверхностного сопротивления  $\rho_s$ , Ом.  
Пропитка ФА (для  $Q = 1$ )

Вид	$\rho_v$	$\rho_s$	вид	$\rho_v$	$\rho_s$
$C_2$	39,489	40,248	$B_1$	-0,079	-0,297
$A_1$	-18,61	-13,296	$B_2 \cdot 10^{-3}$	-1,209	2,827
$A_2$	6,589	9,896	$B_3 \cdot 10^{-5}$	1,152	-1,218
$A_3$	-1,846	-7,678			

Параметры удельного объемного  $\rho_v$ , Ом·см  
и удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$ , Ом.  
Пропитка ФН (для  $Q = 1$ )

Вид	$\rho_v$	$\rho_s$	Вид	$\rho_v$	$\rho_s$
$C_2$	35,787	34,247	$B_1$	-0,156	-0,122
$A_1$	-10,629	-12,026	$B_2 \cdot 10^{-4}$	3,075	1,499
$A_2$	6,91	7,931	$B_3 \cdot 10^{-7}$	0,79	14,49
$A_3$	-4,517	-5,331			

Под каждой таблицей приведен соответствующий вид функции  $C_2(Q)$ , включая и ее параметры.

При расчетах сопротивления с их помощью относительную влажность воздуха и величину пропитки следует брать в долях от единицы.

Относительная среднеквадратичная погрешность рассчитанных логарифмов различных сопротивлений по изложенной методике при параметрах, найденных для каждого значения  $Q$ , не превышает 2-4%. Для осредненных (генерализованных) параметров – 3-5% [99, 119 – 123, 186-191].

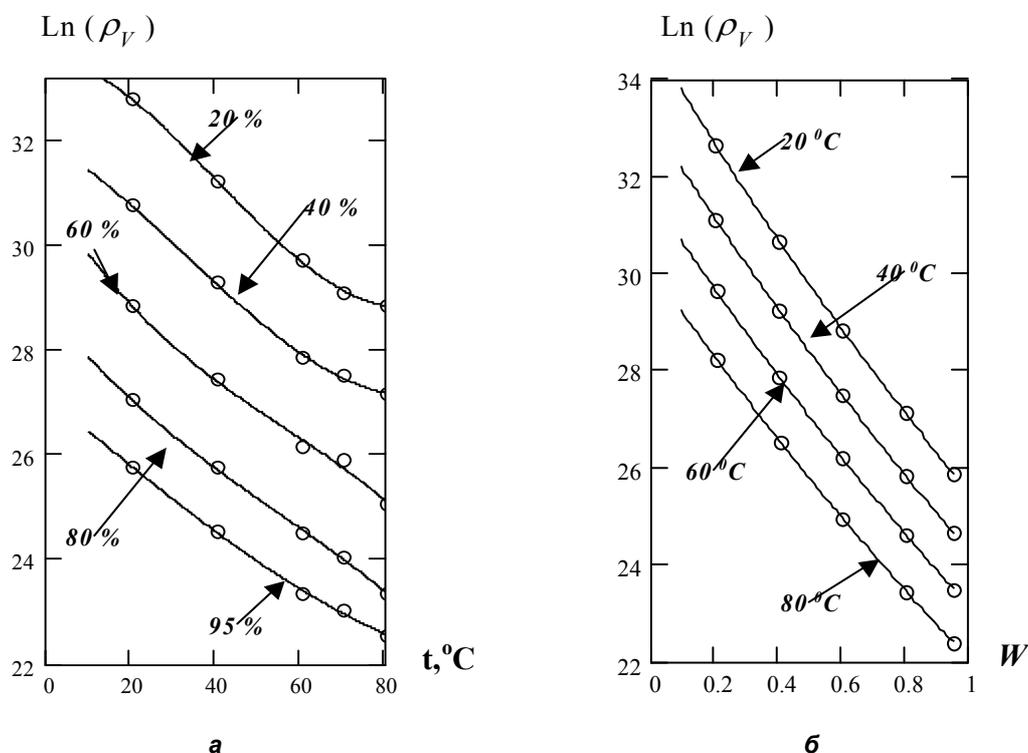
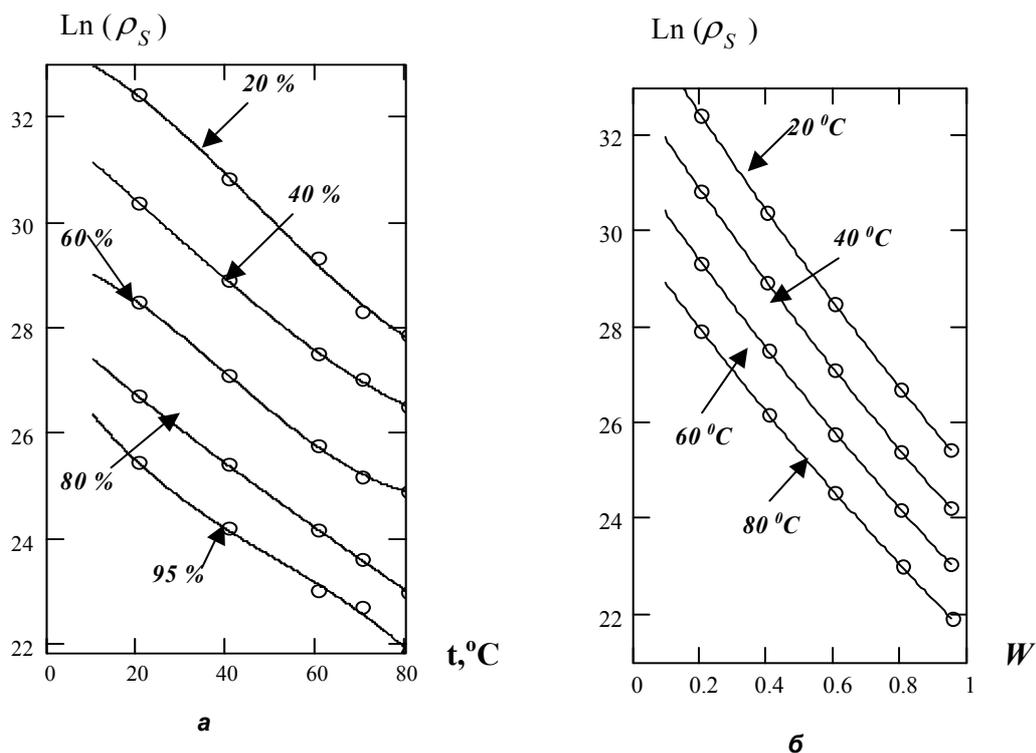
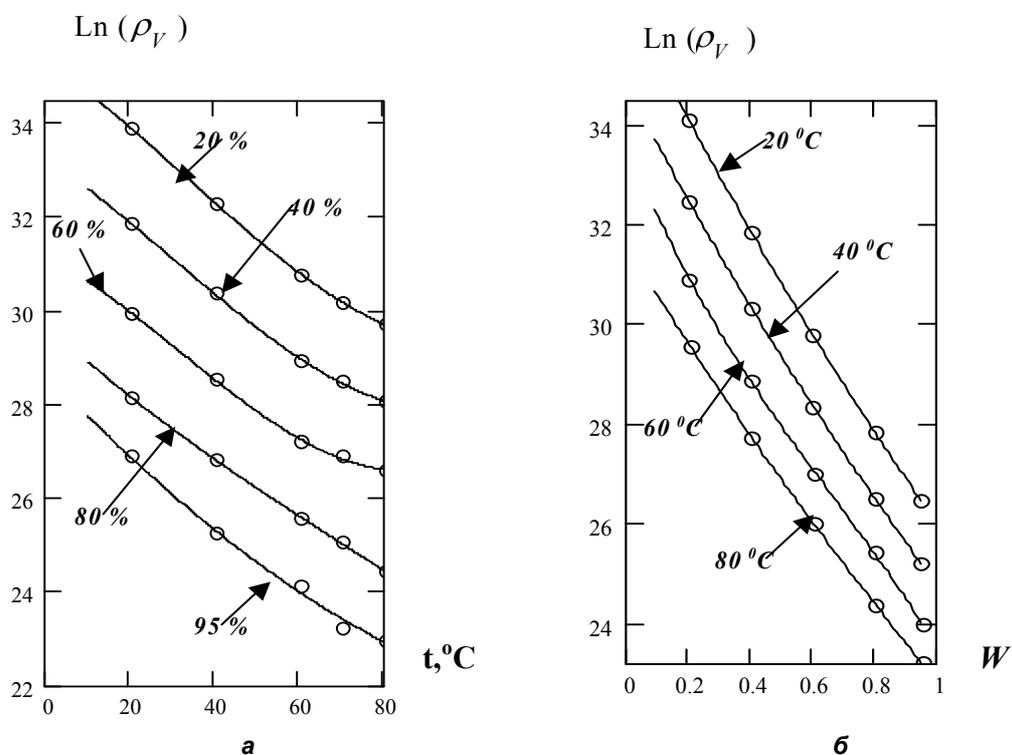


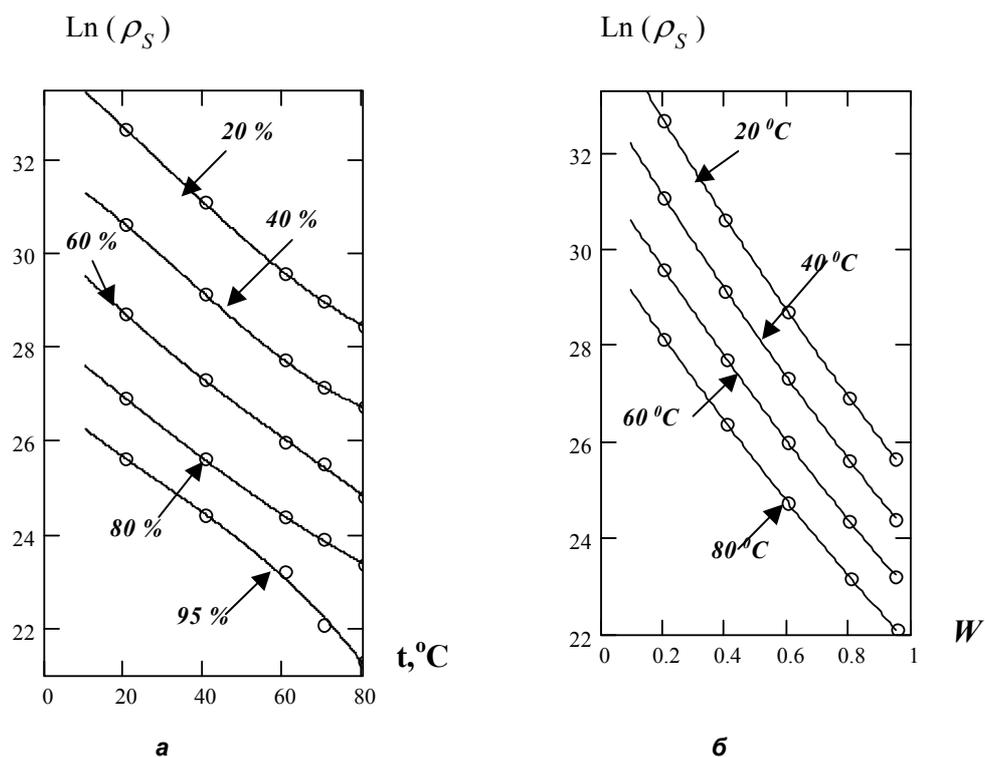
Рис. 39. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КМ 50% концентрации рабочего раствора



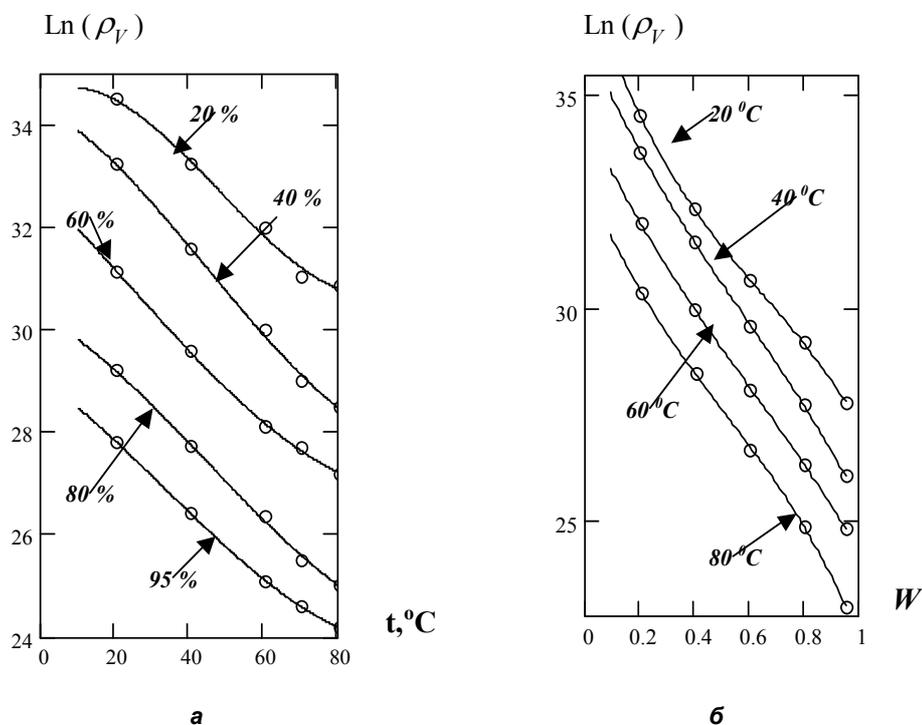
**Рис. 40. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КМ 50% концентрации рабочего раствора**



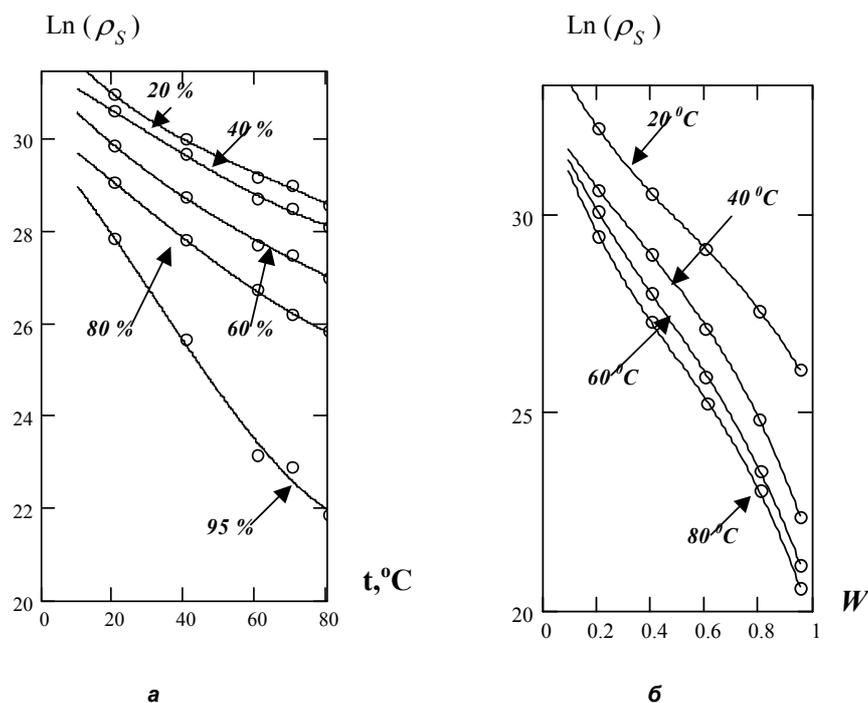
**Рис. 41. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КМ 75% концентрации рабочего раствора**



**Рис. 42. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КМ 75% концентрации рабочего раствора**



**Рис. 43. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КМ 100% концентрации рабочего раствора**



**Рис. 44. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КМ 100% концентрации рабочего раствора**

Зависимости логарифма объемного и поверхностного сопротивления древесины сосны, пропитанной защитными химическими препаратами: ХМ-11, ПХФН, КФА, ФА и ФН от температуры при постоянной относительной влажности воздуха и от влажности при постоянной температуре воздуха представлены в приложении рис. П.2.1. - П.2.18.

На рис. 45 показана связь рассчитанных и измеренных логарифмов сопротивлений для рассмотренных вариантов (рис. 39 – 44, П.2.1.-П.2.18).

Приводятся в окончательном виде формулы расчета сопротивлений древесины сосны в зависимости от  $Q$ ,  $W$  и  $t$  (параметры усредненные) представленные в табл. 17.

Исходя из вышеизложенного и на основании теоретического и экспериментального исследования натуральной и пропитанной древесины сосны, автору работы удалось обосновать критерий влагостойкости древесины.

Основным критерием влагостойкости электроизоляционного материала, является ее удельное объемное сопротивление, полученное в процессе выдержки образцов в условиях постоянной температуры ( $20 \div 80^\circ\text{C}$ ) и переменной относительной влажности ( $20 \div 95\%$ ). Критерий влагостойкости натуральной древесины  $\rho_v$  составляет величину - ( $10^9 \div 10^{10}$ ) Ом·см, а пропитанной - ( $10^{10} \div 10^{15}$ ) Ом·см, в зависимости от вида химической пропитки.

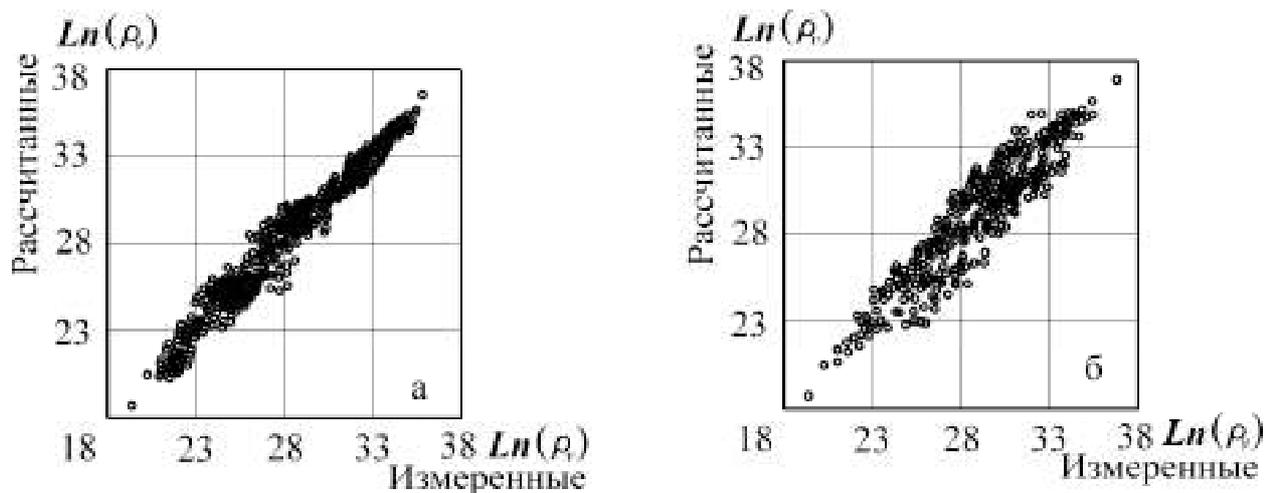


Рис. 45. Связь рассчитанных и измеренных величин логарифма сопротивления в зависимости от принятых параметров в расчетах:

а) для заданной величины пропитки; б) по генерализованной зависимости

Таблица 17

Формулы расчета сопротивлений древесины сосны  
в зависимости от  $Q$ ,  $W$  и  $t$

Пропитка	Расчетная формула	
1	2	
	$\rho_V$ Ом·см	
КМ	$\rho_V(Q, W, t) = 4,71 \cdot 10^{12} \exp(11,7Q + 14,43Q^2 - 20,86Q^3 - 4,62W + 4,16W^2 - 5,13W^3 - 3,39 \cdot 10^{-2}t + 3,49 \cdot 10^{-4}t^2 - 1,29 \cdot 10^{-6}t^3)$	(66)
ХМ-11	$\rho_V(Q, W, t) = 4,43 \cdot 10^{12} \exp(8,01Q + 11,35Q^2 - 16,35Q^3 - 4,67W + 8,21W^2 - 10,15W^3 - 4,71 \cdot 10^{-2}t - 0,81 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,76 \cdot 10^{-6}t^3)$	(67)
ПХФН	$\rho_V(Q, W, t) = 2,31 \cdot 10^{12} \exp(1,079Q + 2,484Q^2 - 3,49Q^3 - 10,5W + 14,44W^2 - 17,854W^3 - 3,67 \cdot 10^{-2}t + 0,483 \cdot 10^{-4}t^2 - 0,497 \cdot 10^{-6}t^3)$	(68)
	$\rho_V$ Ом·см при $Q = 1$	
КФА	$\rho_V(Q, W, t) = 1,733 \cdot 10^{17} \exp(-17,675W + 5,198W^2 - 1,196W^3 - 0,061 \cdot t - 1,396 \cdot 10^{-3}t^2 + 1,037 \cdot 10^{-5}t^3)$	(69)

1	2	
ФА	$\rho_V(Q, W, t) = 1,412 \cdot 10^{17} \exp(-18,61W + 6,589W^2 - 1,846W^3 - 0,079 \cdot t - 1,209 \cdot 10^{-3}t^2 + 1,152 \cdot 10^{-5}t^3)$	(70)
ФН	$\rho_V(Q, W, t) = 3,484 \cdot 10^{15} \exp(-10,629W + 6,91W^2 - 4,517W^3 - 0,156 \cdot t - 3,075 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,79 \cdot 10^{-7}t^3)$	(71)
$\rho_S$ Ом		
КМ	$p_S(Q, W, t) = 1,10 \cdot 10^{13} \exp(7,48Q + 9,29Q^2 - 13,62Q^3 - 4,79W + 5,09W^2 - 6,29W^3 - 5,13 \cdot 10^{-2}t - 4,19 \cdot 10^{-4}t^2 + 4,63 \cdot 10^{-6}t^3)$	(72)
ХМ-11	$p_S(Q, W, t) = 9,20 \cdot 10^{12} \exp(4,00Q + 1,71Q^2 - 2,47Q^3 - 5,37W + 7,62W^2 - 9,40W^3 - 4,55 \cdot 10^{-2}t - 3,16 \cdot 10^{-4}t^2 + 3,52 \cdot 10^{-6}t^3)$	(73)
ПХФН	$p_S(Q, W, t) = 6,46 \cdot 10^{15} \exp(-6,14Q - 1,25Q^2 + 1,75Q^3 - 10,42W + 14,05W^2 - 17,410W^3 - 4,16 \cdot 10^{-2}t + 1,40 \cdot 10^{-4}t^2 - 1,50 \cdot 10^{-6}t^3)$	(74)
$\rho_S$ Ом при Q = 1		
КФА	$\rho_S(Q, W, t) = 2,126 \cdot 10^{17} \exp(-18,346W + 15,301W^2 - 9,435W^3 - 0,171 \cdot t - 0,469 \cdot 10^{-3}t^2 + 0,155 \cdot 10^{-5}t^3)$	(75)
ФА	$\rho_S(Q, W, t) = 3,016 \cdot 10^{17} \exp(-13,296W + 9,896W^2 - 7,678W^3 - 0,297 \cdot t + 2,827 \cdot 10^{-3}t^2 - 1,218 \cdot 10^{-5}t^3)$	(76)
ФН	$\rho_S(Q, W, t) = 7,469 \cdot 10^{14} \exp(-12,026W + 7,931W^2 - 5,331W^3 - 0,122 \cdot t + 1,499 \cdot 10^{-4}t^2 + 14,49 \cdot 10^{-7}t^3)$	(77)
$R_V$ для Q = 0		
Натурал древесина	$R_V(Q, W, t) = 4,02 \cdot 10^{11} \exp(-3,37W + 5,0W^2 - 6,83W^3 - 4,97 \cdot 10^{-2}t - 10,15 \cdot 10^{-4}t^2 + 10,18 \cdot 10^{-6}t^3)$	(78)
$R_S$ для Q = 0		
Натурал древесина	$R_S(Q, W, t) = 1,36 \cdot 10^{12} \exp(-6,56W + 16,1W^2 - 22,23W^3 - 4,83 \cdot 10^{-2}t - 10,80 \cdot 10^{-4}t^2 + 13,2 \cdot 10^{-6}t^3)$	(79)

Разработан метод расчета электрического сопротивления натуральной и пропитанной древесины, который позволяет рассчитывать и прогнозировать свойства древесины, как электроизоляционного материала, используемого в качестве несущих и опорно-поддерживающих конструкций ВЛ и КС, ВСЛ СЦБ, цепей ПЭ.

## **5. НАДЕЖНОСТЬ ДВУХЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СИСТЕМЫ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В РАЙОНАХ С ЗАГРЯЗНЕННОЙ АТМОСФЕРОЙ**

### **5.1. Комбинированная изоляция «фарфор-дерево» воздушных линий, на деревянных опорах**

Повышение надежности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог, нетяговых потребителей и устройств СЦБ - проблема исключительно актуальная, особенно при всё увеличивающейся интенсивности движения и возрастания веса поездов, увеличения загрязненности атмосферы и др.

Несмотря на значительный объем проведенных технических и организационных мероприятий по совершенствованию устройств электроснабжения железных дорог и методов их обслуживания, позволяющих снизить повреждаемость в несколько раз, надежность этих систем и сейчас недостаточно высока [14, 124]. Неполный учет факторов, вызывающих загрязнение изоляционных конструкций, будет и в дальнейшем приводить к перекрытиям изоляции, возгоранию опор и траверс, особенно в регионах с тяжелыми экологическими условиями.

Основные усилия научных организаций СНГ в области исследований перенапряжений электроэнергетических систем сконцентрированы на изучении воздействий на изоляцию сетей высших классов напряжений. Вопрос об условиях функционирования изоляции в сетях средних классов напряжений 3-35 кВ, особенно - с изолированной нейтралью остается, поэтому недостаточно освещенным, вследствие чего относительно высока аварийность в сетях с компенсацией емкостного тока замыкания на землю и изолированной нейтралью. Отдельные средства защиты от перенапряжений не могут обеспечить достаточной надежности работы таких сетей. Опыт эксплуатации энергосистем и ведомственных электрических сетей подтверждает сказанное [31, 50, 124 - 127].

Ежегодно в сетях 3-35 кВ страны отмечается около 4,5 тыс. повреждений изоляции, приводящих к недоотпуску электроэнергии порядка 1,2 млрд. кВт. час. Из этого числа не менее 5-6% недоотпуска энергии связано с несовершенством защиты от внешних и внутренних перенапряжений [126]. Исследованиями установлено, что в распределительных сетях 6-35 кВ в среднем возникает перенапряжение: при однофазных замыканиях на землю - 77%, коммутационных - 17%, по прочим причинам, в том числе феррорезонансных и комбинированных - 6%. Период между перенапряжениями в среднем составляет - 2,5 сут. [128].

Сравнение величины коммутационных перенапряжений с возникающими при дуговых замыканиях на землю, свидетельствует,

что, вопреки существующему мнению, для изоляции сетей 6 и 10 кВ наибольшую опасность представляют не дуговые, а коммутационные перенапряжения [129-130]. Доля аварий от перенапряжений, связанных с однофазными замыканиями на землю, по данным [131-132], составляют 34-80% всех видов аварий.

Правильный выбор уровней изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью обуславливается исключением возможности возникновения однофазных перекрытий изоляторов из-за загрязнений, приводящих к групповым отключениям линий, а также ограничением числа переходов случайных однофазных замыканий на землю (не связанных с загрязнением) в междуфазные короткие замыкания, возникающие вследствие загрязнения комбинированной изоляции «фарфор-дерево» "здоровых" фаз.

Электрическая прочность дерева в комбинированной изоляции «фарфор-дерево» в течение многих лет исследовалась применительно к атмосферным перенапряжениям. Прогресс в координации линейной изоляции, применение деревянных опор в сетях 220 кВ и выше, успешный перевод линий с ДО на повышенное напряжение при уменьшенных уровнях изоляции стимулировали проведение ряда исследований электрической прочности комбинированной изоляции при внутренних перенапряжениях.

Высушенная древесина обладает относительно высокой электрической прочностью, изменяющейся в широком диапазоне в случае ее увлажнения. Установлено, что изоляционные свойства зависят от содержания влаги и характера ее распределения в древесине, а также от увлажнения поверхности, наличия загнивания, трещин и пр. [5, 129, 133], вследствие чего возникает значительный разброс результатов их измерения.

Распределение напряжения по комбинированной изоляции, образуемой гирляндой изоляторов и деревом, происходит согласно схеме замещения узла (рис. 46,а) в которой гирлянда представлена эквивалентными сопротивлениями  $R_r$  и  $R_d$  и ёмкостями  $C_r$  и  $C_d$  соответственно. Поскольку емкости изоляторов и деревянной траверсы невелики (соответственно ~ 100 пф/шт и 4 пф/м), а активное сопротивление под дождем относительно мало (соответственно 1-10 Мом/шт и 0,2-1 Мом/м), емкости схемы оказывают сильное влияние на распределение напряжения по комбинированной изоляции лишь при воздействии импульсных волн; при воздействии же коммутационных волн и особенно рабочего напряжения распределение напряжения по комбинированной изоляции определяется в основном активными сопротивлениями.

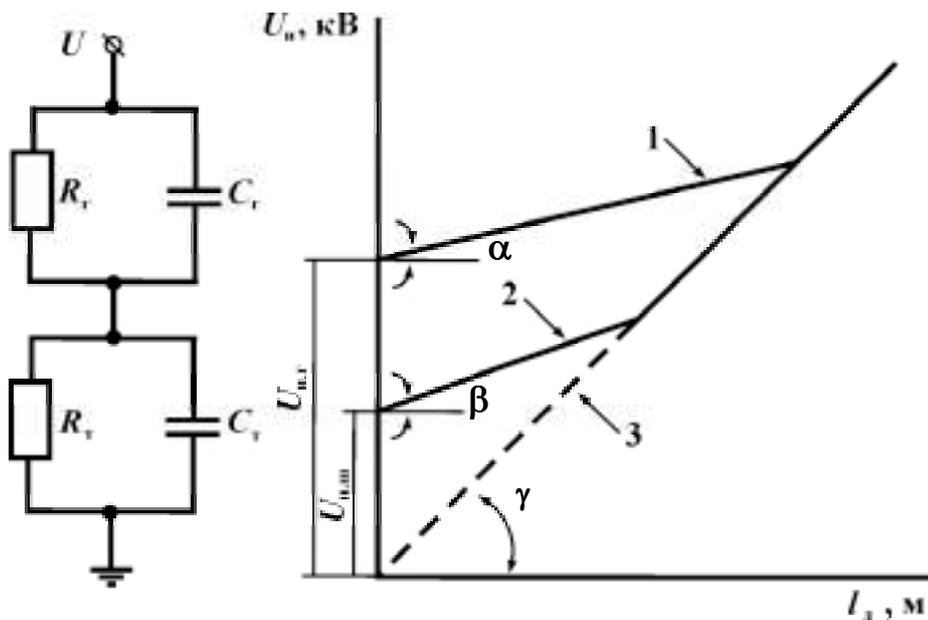


Рис. 46. Схема замещения комбинированной изоляции «фарфор-дерево» (а). Графическое определение минимального импульсного напряжения комбинированной изоляции «фарфор – дерево» (при длине дерева до 3 - 4 м) (б). 1 - дерево и гирлянды подвесных изоляторов; 2 - дерево и штыревые изоляторы; 3 - дерево

Неравномерное распределение напряжения между деревом и фарфором, обусловленное соотношением параметров схемы (рис. 46, а) приводит к каскадному характеру перекрытия комбинированной изоляции, причем первой при этом перекрывается гирлянда. Вследствие каскадности перекрытия добавочная прочность, создаваемая древесиной в комбинированной изоляции, оказывается меньше электрической прочности самой древесины. Импульсную прочность комбинированной изоляции «фарфор-дерево» рекомендуется оценивать на основе графического построения, представленного на рис. 46, б, где через  $U_{и.г}$  и  $U_{и.ш}$  обозначены импульсные 50%-ные разрядные напряжения гирлянды подвесных изоляторов и штыревого изолятора. В тех случаях, когда импульсное разрядное напряжение, в основном, определяется прочностью фарфоровой изоляции, добавляемое деревом минимальное импульсное напряжение принимается равным 100 кВ/м (рис. 46,б  $L \alpha$ ) для штыревых изоляторов и 70 кВ/м (рис. 46,б  $L \beta$ ) - для гирлянд подвесных изоляторов, обладающих по сравнению со штыревыми изоляторами меньшей продольной емкостью.

При больших длинах деревянных изоляций конструкций импульсная прочность комбинированной изоляции определяется древесиной, исходя из градиента 300 кВ/м (рис. 46,б  $L \gamma$ ) [130].

Общая электрическая прочность комбинированной изоляции «фарфор-дерево» значительно ниже суммы прочностей отдельно взятых её элементов. Д. В. Разевиг [133] объясняет это сложным характером распределения напряжения в комбинированной изоля-

ции «фарфор-дерево», зависящим к тому же и от формы воздействующего напряжения.

Уровень изоляции ВЛ на деревянных опорах зависит как от импульсной прочности самих изоляторов, так и от напряжения перекрытия участка ДО, а при наличии заземляющих спусков - только от характеристик изоляторов.

Наиболее полно изучена импульсная прочность дерева, однако имеющиеся в литературе сведения, необходимые для определения разрядных напряжений изоляции ВЛ на ДО, противоречивы. Авторами [134] показано, что импульсная прочность дерева зависит от вида древесины, степени увлажнения, наличия пропитки и возможного загрязнения. В работе же [135] утверждается, что пробивная напряженность практически не зависит от пропитки. Средний разрядный градиент по дереву при воздействии полной импульсной волны оценивается для сухой древесины примерно в 600 кВ/м, а для мокрой - в 300 кВ/м. Эти значения относятся к отрезкам траверс длиной до 2-3 м; для стоек опор длиной 10-12 м средний градиент снижается до 180 кВ/м.

При воздействии, на находящуюся под ливневым дождем древесину, коммутационных волн ( $\tau \approx 0,005$  с) средний разрядный градиент оценивается в 150 кВ<sub>max</sub>/м. Величина мокроразрядного градиента может быть принята равной 110 кВ<sub>max</sub>/м [50] при воздействии напряжения промышленной частоты в течение 1 с.

Длительное воздействие значительного рабочего напряжения приводит к кумулятивному обугливанию и возгоранию древесины, что, конечно, недопустимо [129, 133]. Исследования на типовой комбинированной изоляции «фарфор-дерево» позволили определить минимальное рабочее напряжение, необходимое для поддержания дуги по древесине, которое согласно проведенным экспериментам, равно 11, 33 и 66 кВ. Из них следует, что градиент рабочего напряжения не должен превышать 20 кВ/м, что обеспечивает минимальную вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу (5%) для ВЛ 35 кВ и ниже. Для ВЛ 66 и 132 кВ градиент рабочего напряжения выбран равным 27,5 кВ/м, что приводит к вероятности перехода до 15% [136]. Градиенты рабочего напряжения на дереве для реальных конструкций опор значительно ниже разрядных; кроме того ток утечки по комбинированной изоляции носит скачкообразный характер. Воздействие рабочего напряжения на комбинированную изоляцию является поэтому менее значительным, чем непосредственно на дерево. Необходимы дополнительные исследования для более точной оценки длины гирлянды ДО по рабочему напряжению. Однако уже имеющиеся данные позволяют проводить некоторую разгрузку гирлянд от рабочего напряжения, обусловленную сопротивлением дерева. В районах с сильными загрязнениями окружающей среды этот процесс более интенсивен, однако изоля-

ционные свойства дерева препятствуют возгоранию опор.

Эксперименты по определению градиентов перекрытия влажной древесины широко проводились в Австралии [137]. Исследовалась прочность изоляции влажного дерева совместно с изолятором, то есть при условиях близких к реальным. При форме импульса 1/50 мкс указанный градиент составлял 328 кВ/м, что близко к значению (300 кВ/м) полученному в работах [50, 130]. Авторами [128] в лабораторных условиях установлено, что влияние степени увлажнения дерева на импульсную прочность незначительно и напряженность влажного дерева  $E$  равна 394 кВ/м, что превышает ранее установленную в работе [138], а также приведенные выше значения.

Очевидно, что импульсная прочность комбинированной изоляции должна определяться не простым суммированием пробивных напряжений дерева и изоляторов [50], а более сложной функцией, поскольку при импульсном перекрытии разряд развивается в соответствии с распределением напряжения по емкостным проводимостям компонентов изоляции. Так, в [137] предложена формула определения импульсной прочности изоляции «фарфор-дерево»

$$U_{\text{пер}} = \sqrt{U_{\text{н}}^2 + (E_{\delta} \cdot \ell_{\delta})^2}, \quad (80)$$

где  $E_{\delta}$  - пробивная напряженность изоляции влажного дерева, кВ/м;  $\ell_{\delta}$  - длина пути перекрытия по дереву, м;  $U_{\text{н}}$  - импульсное напряжение перекрытия изолятора, кВ.

Напряжение перекрытия комбинированной изоляции «фарфор-дерево» с точностью до  $\pm 15\%$  можно рассчитать с помощью следующей зависимости [136]

$$U_{\text{пер}} = \sqrt{U_{\text{ф}}^2 + U_{\delta}^2}, \quad (81)$$

где  $U_{\text{ф}}$ ,  $U_{\delta}$  - напряжение перекрытия фарфора и дерева соответственно.

Частичных перекрытий элементов комбинированной изоляции до полного перекрытия не произойдет, если напряжение комбинированной изоляции «фарфор-дерево» будет выражено следующим образом

$$U_{\text{пер}} = \frac{C_{\text{ф}} + C_{\delta}}{C_{\delta}} U_{\text{ф}}, \quad (82)$$

где  $C_{\text{ф}}$ ,  $C_{\delta}$  - емкость фарфорового элемента и древесины соответственно.

Прочность комбинированной изоляции под дождем оценивается В.С. Рашкесом [10] по формуле

$$U_{\text{мрк}} = \alpha k_{\tau} U_{\text{мр}}, \quad (83)$$

где  $U_{\text{мрк}}$  - мокроразрядное напряжение гирлянды, кВ;  $k_{\tau}$  - коэффициент импульса;  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий влияние дерева. Для линий 35 - 110 кВ коэффициент принимается равным 1,2 - 1,25.

Практические расчеты длин гирлянд на деревянных опорах по условиям воздействия коммутационных и атмосферных перенапряжений показали, что при сохранении изоляционной прочности, установленной для металлических опор, число изоляторов в гирляндах деревянных опор может быть уменьшено на один (а в некоторых случаях даже на два) по сравнению с нормативами. Это согласуется с успешной эксплуатационной практикой в сетях 35-220 кВ.

Переход импульсного перекрытия в силовую дугу для изоляции «фарфор-дерево» имеет сложный характер, в виду того, что при напряжении промышленной частоты дерево следует рассматривать как сопротивление [127]. И поэтому распределение напряжения в значительной степени будет зависеть от состояния древесины, так как сопротивление дерева является функцией степени его увлажнения. Кроме того, на вероятность установления силовой дуги оказывают влияние дугогасящие свойства дерева. Авторы [136, 139-140] утверждают, что при малых значениях напряженности вероятность установления силовой дуги выше. Это обусловлено, видимо, тем, что при низких градиентах дуга находится на поверхности древесины, и, следовательно, на вероятность ее установления будут оказывать влияние дугогасящие свойства древесины, различные у разных пород дерева.

Проведенные исследования уровней комбинированной изоляции «фарфор-дерево» [52] показали: грязеразрядное напряжение увеличивается в 1,5-1,8 раза при применении обычных изоляторов с изоляционной глазурью и в 2,4-2,6 раза - с полупроводящей. Деревянные траверсы и опоры по сравнению с металлическими повышают грозоупорность линий в условиях интенсивного загрязнения уносами, так как для линий 110...220 кВ на металлических опорах вероятность перекрытия гирлянды изоляторов достаточно велика - 0,6...0,8, а для линий на деревянных опорах мала - 0,1...0,2 [141]. При загрязнении окружающей среды солевыми уносами возгорание ДО наступает независимо от количества и типов изоляторов в гирлянде. Во всех случаях, когда электрическое сопротивление загрязненных изоляторов меньше сопротивления древесины всегда происходит её возгорание, в противном случае древесина не загорится, а на изоляторах возникнут частичные разряды. Для предотвращения возгорания древесины траверс необходимо следить за тем, чтобы сопротивление загрязненных изоляторов было всегда выше, чем древесины. При равенстве же сопротивлений траверсы и изолятора возникают частичные разряды на древесине изоляционных конструкций ВЛ.

Авторами [52, 142] утверждается что, в районах, где удельное поверхностное сопротивление слоя загрязнения на изоляторах превышает 30-40 кОм, отсутствует опасность возгорания древесины малыми токами утечки. Если используются изоляторы, с полупрово-

дящей глазурью, возгорания деревянных образцов не наблюдается независимо от величины сопротивления слоя загрязнения на изоляторах, а в регионах с интенсивным загрязнением целесообразно использовать ДО и траверсы. Необходимо поддерживать состояние изоляционных конструкций, при котором изоляционное расстояние по дереву равно длине пути утечки по изоляторам [154].

## **5.2. Состояние поверхности несущих и опорно-поддерживающих конструкций ВЛ, находящихся в эксплуатации**

Обеспечение длительного срока эксплуатации деревянных изоляционных конструкций ВЛ и КС является одним из основных условий их применения. Важная характеристика конструкций из дерева применяемых в строительстве и находящихся в эксплуатации на ЛЭП - срок службы древесины. Срок эксплуатации таких линий, как правило, превышает срок службы деревянных конструкций, поэтому отечественными и зарубежными исследователями большое внимание уделяется вопросу химического воздействия на древесину. В настоящее время для различных условий можно достичь любой продолжительности срока службы древесины путем доступной и экономически приемлемой пропитки защитными химическими препаратами (антисептиками, консервантами и антипиренами), количество которых точно рассчитывается. Защита древесины от возгорания и разрушения агрессивными средами осуществляется согласно [118].

Проблема защиты деревянных элементов воздушных линий (ВЛ) от воздействия биоразрушения, особенно в районах с загрязненной атмосферой, стала одной из актуальнейших в области повышения надежности их функционирования. Древесина, будучи естественным компонентом биоценоза, подвергается значительному разрушающему действию различных биоагентов: бактерий, грибов и насекомых. Необходима борьба с разрушительной деятельностью каждой экологической группы, разработка методов профилактики и мероприятий по их истреблению. Защита деревянных изоляционных конструкций связана с надежностью работы электрических систем и систем электроснабжения железных дорог, экономией металла, повышением долговечности древесины и т. д. Ежегодная сумма потерь, официально учтенных как результат биоповреждений по 14 наиболее развитым странам Европы и Северной Америки, составила свыше 2% стоимости произведенной продукции [144].

Ежегодно по аварийной статистике фиксируется 100-400 случаев аварий ЛЭП, связанных с возгоранием деревянных опор (ДО). Это может происходить под действием токов утечки, прямых ударов молнии и низовых пожаров. Кроме того, имеется большое количест-

во случаев возгорания, не вызывающих аварий, но требующих замены поврежденных элементов опор (распределение причин отключения ВЛ представлены в табл. П.1.1 и П.1.2. Возгорание опор на линиях 0,4-20 кВ составляет 4,9% всех повреждений [31, 143]. Возгорания деревянных элементов ВЛ наблюдается во всех регионах с загрязненной атмосферой.

Первый официальный документ, регламентирующий мероприятия по борьбе с возгоранием ДО ЛЭП 35-110 кВ от токов утечки, упоминается в работе [146]. В настоящее время это один из наиболее распространенных видов повреждения, а в районах с интенсивными промышленными и естественными загрязнениями - доминирующий над другими.

Для предотвращения возгорания деталей опор ВЛ принимаются следующие меры: установка шунтирующих бандажей, плотная посадка болтов в древесине, увеличение числа изоляторов в гирлянде, искусственные способы улучшения разрядных характеристик изоляторов и замена загрязненной изоляции на чистую [147-152, 52, 153-155]. Однако утверждается, что шунтирование дерева ВЛ металлическими бандажами производить не следует.

В настоящее время проблема воздействия токов утечки на древесину изучена слабо и представляет интерес с точки зрения разработки эффективных мер защиты и совершенствования методов эксплуатации ДО воздушных линий и деревянных изоляционных конструкций КС в условиях загрязненной атмосферы.

В научной литературе приводятся многочисленные значения токов утечки не позволяющие, однако, сделать общий вывод об их возможных предельных величинах, соответствующих различным атмосферным условиям и степени загрязненности изолирующих конструкций.

Автор [153] исследовал токи утечки по линейным изоляторам при воздействии искусственного дождя на гирлянде из 4 - 7 элементов изоляторов типа П - 4,5 при напряжении 67 кВ и установил что, величина измеренных токов утечки равна 4-9,6 мА. Для подвесной гирлянды из 5 элементов П - 4,5 ток утечки при напряжении 70 кВ составил 8 мА. В атмосфере тумана, морозящего дождя или при воздействии росы и инея наблюдается иная картина. Так, на гирлянде из 7 элементов изоляторов типа П - 4,5 при напряжении 67 кВ ток утечки достигал 15, а у гирлянд из 4 элементов - 42 мА. Г.А. Лебедев отмечает, что величина непрерывно протекающего по гирлянде загрязненных подвесных изоляторов тока при воздействии атмосферных осадков не превосходит 1 мА. Однако при меньших запасах электрической прочности величины скачков тока утечки могут достигать больших величин - до 200-300 мА [153, 155].

В неблагоприятных случаях возгорание ДО начинается уже при токах утечки, составляющих 5-10 мА [154], более 5 [155], 1-7 [3], 15-

20 [156] и 80 - 100 мА [157]. Значение опасных токов утечки колеблется в пределах от десятков до сотен миллиампер, продолжительность - от нескольких до десятков полупериодов [158]. К.Д. Вольпов и Л.С. Майкопар [159] зарегистрировали токи утечки в 0,16 А. В зависимости от толщины водяной пленки и удельной электропроводности воды величина тока утечки колеблется обычно от 5 до 100 мА [130]. Перекрытие загрязненной изоляции происходит при токах утечки более 100 мА, а при увлажнении изоляции броски тока достигают величины 50-150 мА и более [130]. В предразрядном режиме изолятора амплитуды импульсов токов утечки могут составлять в обычных условиях порядка 10 мА, а в сильно загрязненных районах -  $10^2$ - $10^3$  мА. На стенде в ОРУ Прибалтийской ГРЭС зарегистрированы, токи до 150 мА; на стенде в районах с засоленными почвами наблюдались броски тока утечки до 3 А [147]. Возгорание узла крепления траверсы к опоре наблюдается при токах утечки, составляющих 2-3 мА [160].

В качестве мер, предотвращающих такие явления, может использоваться снижение напряженности электрического поля на опоре за счет увеличения расстояния между опорой и фазовым проводом или установкой вокруг опоры экранированной металлической сетки. Более экономично снижение влагоабсорбционных характеристик древесины опоры [161, 162]. Реализация этого мероприятия в США предусматривает очистку опор от грязи, классификацию их и повторную пропитку [163].

В работах [164, 165] исследуется явление возгорания ДО ЛЭП 115 -345 кВ вследствие возникновения емкостных потенциалов в зонах большой напряженности поля, которые возникают при увлажнении или при неравномерном высыхании дерева и приводят к образованию дугового разряда. В зоне крепления троса возникает наибольшая напряженность, вызывающая обугливание и возгорание этого участка опоры. Важной мерой ограничения высоких концентраций поля и снижения вероятности возгорания является применение неметаллических пластиковых креплений троса.

Р. Филтер [166] провел серию интересных испытаний образцов ДО ВЛ из 7 различных пород, пропитанных тремя различными составами антисептиков с целью установления величины токов утечки, вызывающих возгорание древесины, а также степени воздействия тока утечки на монтера, прикоснувшегося к опоре на высоте 1,5 м от уровня земли. Сообщений подобного рода в отечественной литературе практически не встречалось. Представляет научный и практический интерес закономерность изменений электрических свойств пропитанной древесины в соответствии с эксплуатационными факторами для установления предельных величин тока утечки.

В основе всех процессов теплового разрушения деревянных

изоляционных конструкций ВЛ от токов утечки лежит процесс изменения электрических свойств древесины. Эти свойства зависят от качества, вида, концентрации и способа химической пропитки; гигроскопичности древесины; атмосферных условий и др.

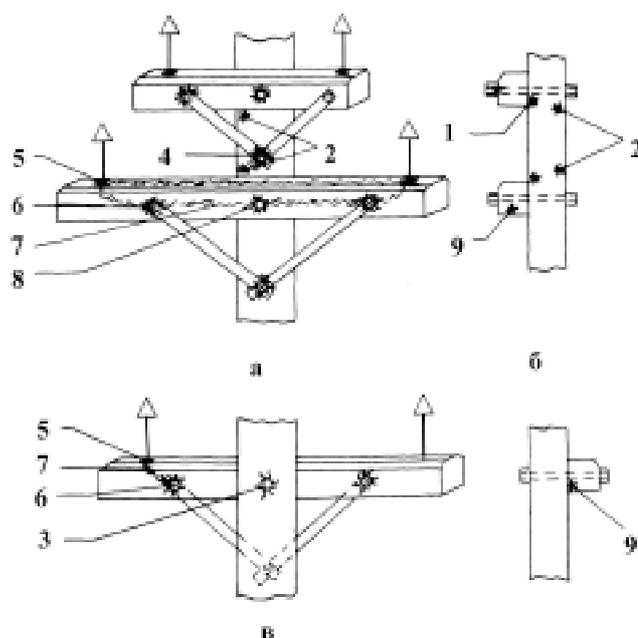
Опыт эксплуатации комбинированной изоляции «фарфор-дерево» в условиях интенсивного загрязнения атмосферы регионов и аккумуляции солепылевых отложений на поверхностях изоляционных конструкций воздушных линий железных дорог остро ставит перед энергетиками проблему снижения повреждаемости сетей 6-35 кВ, вызванной ухудшением электроизоляционных свойств дерева. Уменьшение уровня изоляции «фарфор-дерево» стимулировало проведение в настоящей работе дополнительных исследований по количественному и качественному химическому составу солепылевых отложений, изысканию эффективных средств защиты деревянных элементов ВЛ от возгорания и стабилизации активного сопротивления дерева в условиях увлажнения атмосферными осадками.

На фото П.3.2 - П.3.32 приведены результаты натурных обследований воздушных линий продольного электроснабжения в районах Приаралья, разнообразные виды деструкции, факты возгорания и пожаров деревянных элементов на участках ВЛ 10 кВ.

Разрушение ДО токами утечки связано с увлажнением загрязненных поверхностей траверс и опор, находящихся под высоким напряжением. В результате протекания токов утечки на поверхности изоляционных конструкций ВЛ образуются углеродистые канавки (треки) или дефекты со сложным рисунком.

Для оценки степени разрушения древесины траверс и опор от токов утечки, а также в целях организации мер по ограничению этого явления, уменьшения материального ущерба, связанного с возгоранием и пожарами ДО разработана классификация дефектов (треков) - характерных мест их образования на поверхности траверс и опор (рис. 47) [31,125].

На рисунке под номером 1 указан участок поверхности стойки под траверсой в зоне центрального болта крепления ее к опоре; 2 - то же между центральными болтами крепления траверс к опоре; 3 - участок поверхности под центральным болтом крепления; 4 - то же в зоне крепления укосины; 5 - участок поверхности траверсы под штырем (наиболее часто встречающийся дефект); 6 - то же под укосиной и в зоне болта ее крепления; 7 - участки боковых поверхностей траверсы между штырями, металлическими элементами крепления и укосины; 8 - участок поверхности траверсы в зоне центрального болта крепления; 9 - участок боковой поверхности траверсы, обращенной к опоре в зоне центрального болта ее крепления.



**Рис. 47. Распределение трекв (дефектов) на деревянных элементах: а) вид опоры со стороны расположения траверсы; б) вид опоры с противоположной стороны крепления траверсы; в) вид опоры с боку**

Результаты натурного обследования поверхности 424 элементов деревянных опор участка ВЛ 10 кВ Ажинияз - Абадан Среднеазиатской железной дороги длиной 22,9 км представлены на рис. 48. Проведенные натурные обследования состояния элементов воздушных линии продольного электроснабжения 10 кВ позволили установить, что все траверсы находящиеся в эксплуатации 2 и более лет имеют характерные следы возгораний и пожаров от токов утечки. Установлено, что все без исключения траверсы после 2 лет эксплуатации на участке имеют следы кумулятивного разрушения древесины - треки.

Наиболее интенсивное разрушение - древесины траверс токами утечки происходит в результате дефекта 5 (95,3%), затем - 6; при дальнейшем развитии они преобразуются в дефект 7. После 5 лет эксплуатации опор в Приаралье происходит интенсивная деградация древесины траверсы, на которой образуются глубокие трещины, сколы, углубления в которых накапливается соледержащая пыль, превращающаяся при увлажнении в проводник второго рода. У траверс с 10-летним и более сроком эксплуатации дефект 7 усугубляется, при этом глубина следа-трека растет с увеличением срока эксплуатации и может достичь 2 см через 12-15 лет эксплуатации траверс. Этот дефект отличается от остальных сложной картиной направления движения и развития схемы разрушения поверхности траверс треками. К 15 годам эксплуатации в результате него разрушается до 30-35% поверхности древесины траверс. Большая часть следов возгорания в виде обугленных участков поверхности и трекв приходится на участки траверс между крайним штырем и болтом

укосины, а возгорание опор происходит в местах крепления траверсы к стойке. Загнивание опор протекает снизу вверх под действием столбового гриба от уровня земли до высоты 5-6 м, часть опор после 12 и более лет эксплуатации поражена Туркестанским термитом. На обследуемых участках Среднеазиатской железной дороги наблюдается массовое коррозионное поражение пасынков, которое также распространяется снизу вверх.

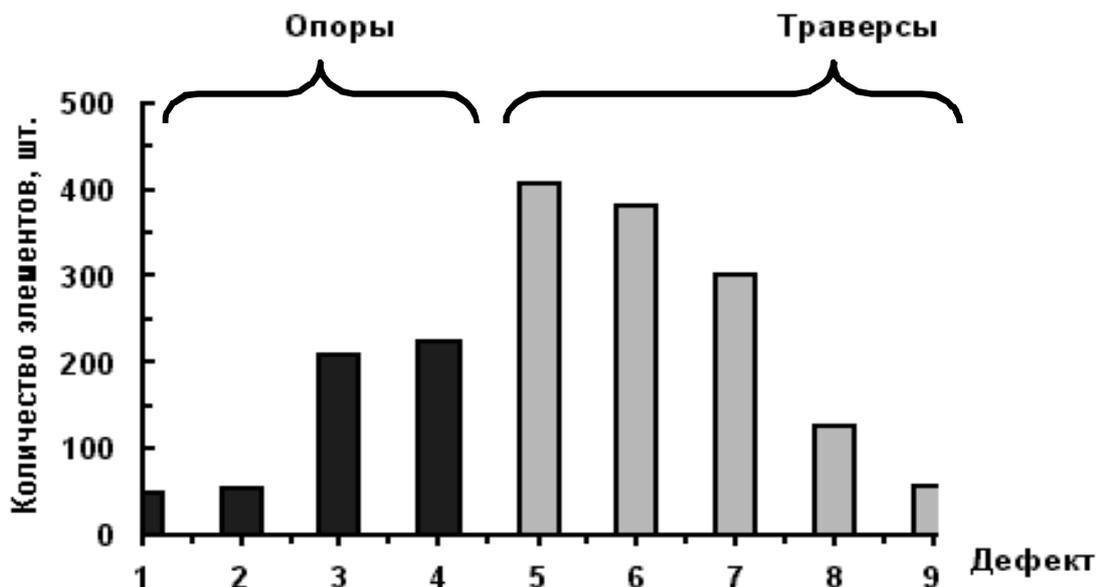


Рис. 48. Диаграмма распределения треков по древесине опор и траверс на участке ВЛ 10 кВ Ажинияз-Абадан

Однако наиболее благоприятное для возгорания древесины ВЛ можно считать состояние после 5-7 лет эксплуатации. Возгорание траверс и опор ухудшает их техническое состояние, ускоряет процессы износа и старения конструкций, снижая пределы допустимых нагрузок ВЛ в целом [167].

Анализ натуральных исследований состояния древесины опор и траверс ВЛ в Приаралье показал, что разрушение древесины под действием токов утечки начинается в зоне заусениц, острых бортиков и металлических выступов или неровностей штампованных деталей арматуры крепления.

Количество траверс, подверженных возгоранию и пожарам возрастает уже в первые 2-3 года эксплуатации. Можно указать на характерные для этих сроков эксплуатации траверс следы возгораний (фото П.3.26).

Пожары возникали на траверсах в зоне крепления их к укосинам и центрального болта. Пожары траверс (фото П.3.26) могут завершаться возгоранием древесины в стороне центрального болта ее крепления (фото П.3.30). Пожар обусловлен последовательным образованием и развитием дефектов 5, 6, 7- треками между болтом

крепления укосины на траверсе и нижним концом штыря. Одновременное образование и развитие дефектов 5, 6, 7 - наиболее распространенный процесс разрушения древесины обследованного участка ВЛ в Приаралье (фото П.3.21, П.3.22, П.3.23). Направление пожара на траверсе соответствует направлению ветра в Приаралье в это время года.

Однако многочисленные факторы не всегда способствует развитию образования трещин, переходящих в пожары. На обследованном участке ВЛ имеется большое количество траверс, разрушенных действием токов утечки, но по тем или иным причинам не сгоревших. Установлена зависимость состояния поверхности древесины от действия токов утечки и сроков эксплуатации. На фото П.3.31 показаны интенсивность образования трещин под штырем и следы пожаров траверсы более или менее характерных для эксплуатации ее в течение 5-7 лет. На фото П.3.31-П.3.32 просматривается динамика, развития трещин и следы пожаров на верхней полочке траверсы. Характерные трещины - следы многочисленных случаев возникновения пожаров на траверсах за 15-летний период их эксплуатации приведены на фото П.3.32.

Результаты обследования состояния поверхностей сгоревших траверс и опор, мест возникновения очага возгорания на них, то есть дефектов, инициирующих пожар и аварию на линии (рис. 49), позволили заключить следующее.

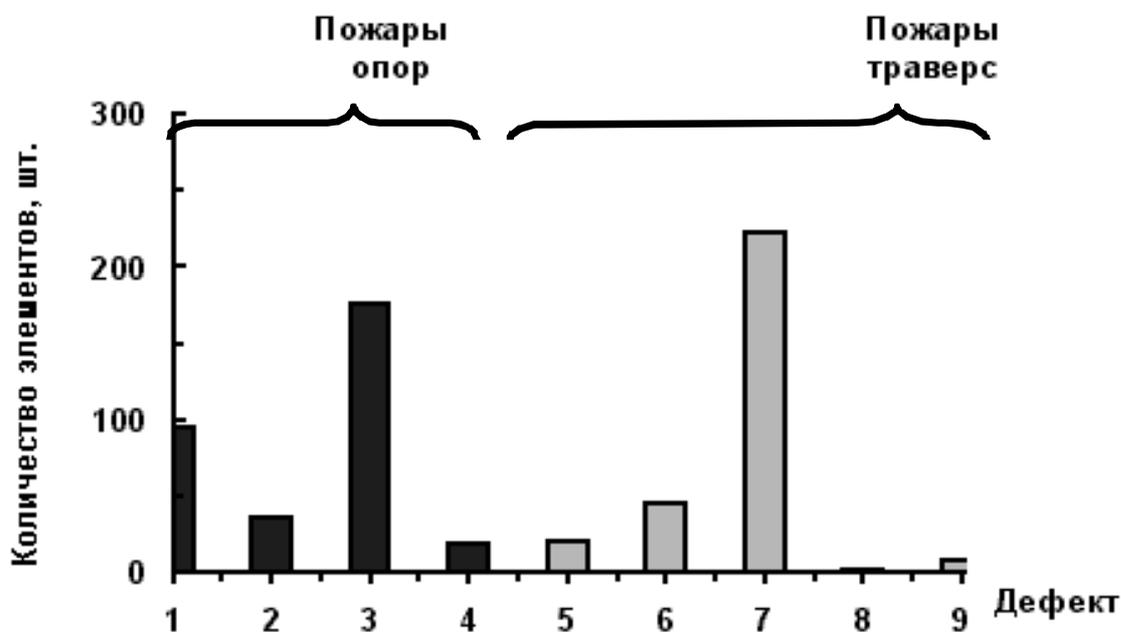


Рис. 49. Диаграмма распределения пожаров опор и траверс в соответствии с классификацией дефектов. Участок ВЛ 10 кВ Кунград - Бейнеу. Данные за 1984-1988 г.г.

Развитие сети трещин на поверхности траверс и опор ВЛ происходит по следующим этапам. Первый характеризуется образованием трещин на поверхности элемента опоры, прилегающей к метал-

лическим частям. Это явление наблюдается через 2-3 г. эксплуатации, в условиях регионов с загрязненной атмосферой. На втором этапе развития сети трекв завершается соединением металлических креплений опоры или траверсы. Этот период более длителен и сопровождается расширением и углублением трекв на поверхности древесины, образованием сложной картины их развития. Испещренные треками участки поверхности древесины траверс или опор являются местами наиболее интенсивных отложений и накоплений солончаковой пыли. Такое состояние поверхности элементов ВЛ в случае их увлажнения приводит к возгоранию и пожарам при малых величинах токов утечки. Разрушение поверхности опор токами утечки происходит в основном в результате дефектов 2, 3 и 4. Дефект 1, как и все перечисленные, является пожароопасным. Дефект 2 часто встречается на опорах, находящихся в эксплуатации. Факты возгорания стоек опор имеются, но опор, сгоревших из-за дефекта 2, за период обследования ВЛ не выявлено. Основная часть пожаров ДО связана с дефектом 3 - 176 шт. (рис.49). Возникновение и развитие дефектов 5, 6 (одновременно или нет) к 3-5 годам эксплуатации траверс завершается дефектом 7, на который приходится самое большое количество пожаров траверс (222 шт.). На дефект 6 приходится 45 шт., на дефект 5 - 21 шт. Очевидно, что дефект 5, 6, 7 - наиболее опасные в аварийном отношении участки траверс, требующие химической защиты. На долю наиболее распространенного дефекта 5 приходится меньшее количество случаев возгорания траверс, чем на дефект 7. Однако по степени возможного возгорания траверс дефекты 5, 6, как и 8, 9, равны между собой. Из-за дефектов 8, 9 было снято с эксплуатации соответственно 9 и 3 траверсы. Однако возможно, что дефекты 8, 9 послужили причиной сгорания 92 деревянных опор.

Наиболее распространенный очаг возникновения пожаров траверс и опор - металлические узлы крепления штырей, укосин на траверсах и траверс к опорам.

При эксплуатации деревянных элементов ВЛ в загрязненной атмосфере образование и развитие трекв, пожаров - явление повсеместное, без принятия своевременных и соответствующих мер химической и других видов защиты прогрессирующее [119]. Как показало натурное обследование состояния поверхности древесины ВЛ, разрушение идет в двух направлениях, имеется общее начало - трек - и источник образования - ток утечки. В одном случае разрушение развивается по структуре трек - пожар (при благоприятных климатических условиях). Второе направление связано только с интенсификацией трека, то есть с ростом площади углеродных мостиков-треков в зависимости от увеличения сроков эксплуатации траверсы. Подобное разрушение траверсы не завершается пожаром и не оказывает существенного влияния на сроки ее эксплуатации по

механическим характеристикам древесины.

Эффективное средство защиты древесины ВЛ от образования трещин и устранения пожаров - комбинированные химические средства защиты ее от биоогнезащиты. Анализ данных повреждений, различных форм состояния и износа элементов ВЛ, особенно древесины, показывает, что в последние годы физический износ в большинстве случаев доминирует над экономическим, техническим и др.

Возгорание деревянных опор в районах с загрязненной атмосферой вследствие токов утечки в настоящее время является одним из распространенных видов повреждений и проблема защиты их от огнезащиты в районах с загрязненной атмосферой весьма актуальна. Это подтверждается и сопоставлением времени на восстановление линии после повреждений, вызванных возгоранием и погодными условиями.

Внезапный перерыв питания, особенно железнодорожных потребителей, влечет за собой вынужденные задержки движения нескольких поездов и экономический ущерб. Число повреждений от возгорания и погодных условий составляет 50-90% общего количества. По количественным характеристикам эти два серьезных фактора различаются незначительно. На данной трассе ВЛ энергоучастка составляющая определения экономического ущерба от длительности восстановления работоспособности линии в условиях загрязненной атмосферы преобладает. Капитальные затраты в условиях данной природной среды превышают годовые расчетные данные в среднем в 2,8 раза.

Процесс загрязнения изоляционных конструкций ВЛ 10 кВ весьма сложен и обусловлен рядом факторов, оказывающих неоднозначное влияние и изменяющихся во времени: численностью источников загрязнения атмосферы, характером перевозимых грузов и концентрацией загрязняющих компонентов, их физическими свойствами и химическим составом; метеорологическими условиями; и т. д.

Первоочередной параметр, по которому должен осуществляться контроль поверхностных слоев, - их составом. Для поверхностей деревянных траверс, железобетонных элементов ВЛ - характерна сложная неоднородность. Для контроля состояния таких поверхностей был использован рентгеноспектральный микроанализ (РСМА).

Использованный в настоящей работе, микроанализатор "Камебак" (фирма "Сатеса", Франция) оснащен микрокомпьютером, автоматизирующим управление прибором и обработку получаемой информации.

Рентгеноспектральный микроанализ деревянных изоляционных конструкций чрезвычайно сложен. Было проведено исследование деревянных траверс спустя 2,5, 5, 10, 15 лет эксплуатации, а

также траверс, где возникло возгорание. Регистрировался состав элементов на поверхности траверсы, а также при срезе на глубину 4 мм. Следует отметить, что на этой глубине мы уже практически имеем дело с чистой древесиной. Загрязнения наблюдаются на глубине до 10-30 мкм, сравнимой с толщиной волокон древесины.

Анализ проведен по следующим элементам: на Na, Mg, Al, S, Si, Cl, K, Ca, Cr, Fe, Cu. Кроме того, сняты электроноскопические снимки с поверхностей с увеличением x200, x800, x1600.

Результаты анализа представлены, на фото П.3.33-П.3.48. Следует отметить, что составы поверхности траверсы после 2,5 лет эксплуатации и поверхности сгоревшей траверсы практически идентичны, поэтому на фото П.3.35-П.3.36 приводятся только результаты анализа сгоревшей траверсы.

Время "накопления" сигнала по каждому элементу в зависимости от срока эксплуатации не изменялось и составляло примерно от 8 до 48 с.

Рассмотрим данные микроанализа содержания загрязнения поверхности деревянных траверс (фото П.3.33 – П.3.48). Общая характеристика этих данных следующая.

Частицы пыли, содержащие Mg, Al, Si, Ca, Na, группируются в межволоконном пространстве, частицы же, содержащие S, Si, K и частично Ca, группируются в основном вдоль волокон. В то же время элементы Na, Cl, K, а особенно Fe, равномерно распределены по всему объему поверхности. Сопоставление данных по Na, Cl, S показало, что они находятся в виде солей - NaCl, KCl и сульфатов - Na, K.

В табл. 18 представлены данные о количественном содержании элементов (в пересчете на оксиды) на поверхности древесины в зависимости от срока эксплуатации траверс.

Таблица 18

**Данные о количественном содержании элементов на поверхности деревянных изолирующих конструкций**

Оксид	Содержание элементов в зависимости от срока эксплуатации, %		
	5 лет	10 лет	15 лет
Na <sub>2</sub> O	0,75	0,4	0,4
MgO	0,93	0,9	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	1,9	1,9
SiO <sub>2</sub>	1,0	17,1	39,3
Cl	0,7	0,4	0,3
K <sub>2</sub> O	1,0	1,4	0,8
CaO	4,1	8,3	14,8
S	0,7	0,4	0,2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	1,0	2,5

Электронно-микроскопическими анализами на поверхности траверсы выявлены волокна древесины толщиной от 1 до 20 мкм. На волокнах древесины и в пространстве между ними фиксируются частицы пыли размерами до 50 мкм.

Как видно, с увеличением времени эксплуатации растет содержание элементов кремния, кальция и частично Сг, то есть увеличивается содержание кремнезема -  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaCO}_3$ . Содержание других соединений практически не изменяется в зависимости от срока эксплуатации траверсы, что вполне объяснимо. Так как в процессе их эксплуатации длительное воздействие осадков приводит к вымыванию осевших в древесине растворимых солей. Нарастает лишь запыленность нерастворимыми соединениями кремнеземами и карбонатами.

Следует отметить, что в траверсе после 2,5 лет эксплуатации и на поверхности сгоревшей траверсы повышено содержание хрома и меди.

### 5.3. Исследование распределения электрического потенциала по поверхности деревянных траверс

Измерение распределения потенциала по поверхности деревянных траверс производилось прибором типа С-100 на воздушно-сухих и увлажненных траверсах. Схема установки исследования представлена на рис. 50.

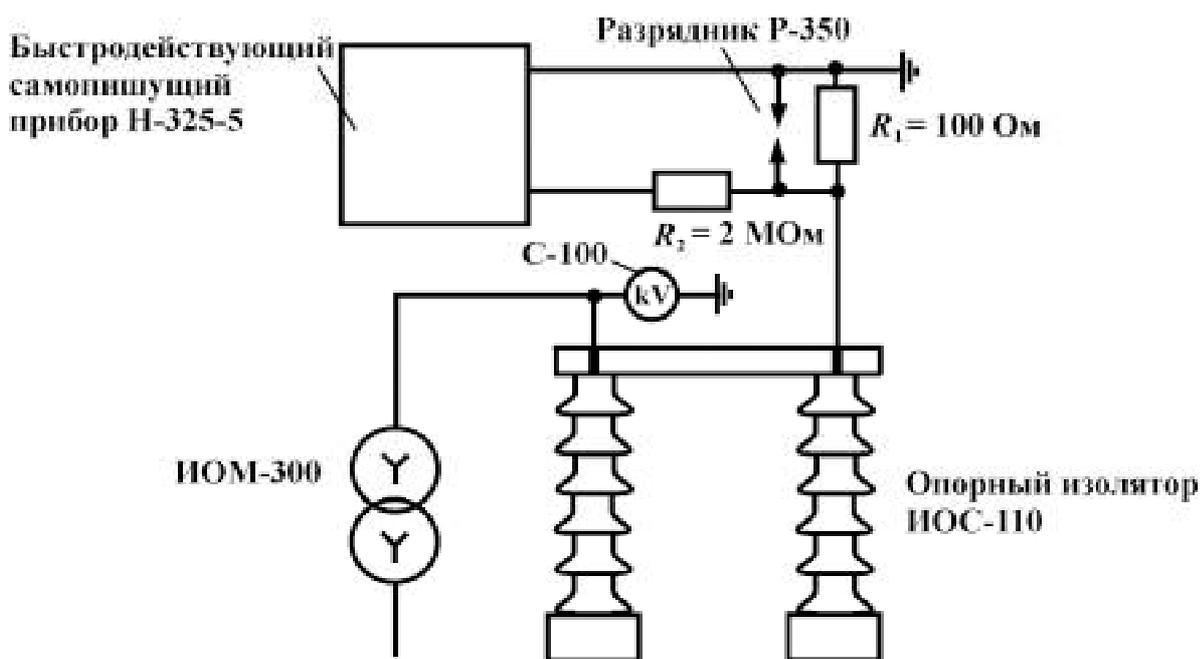
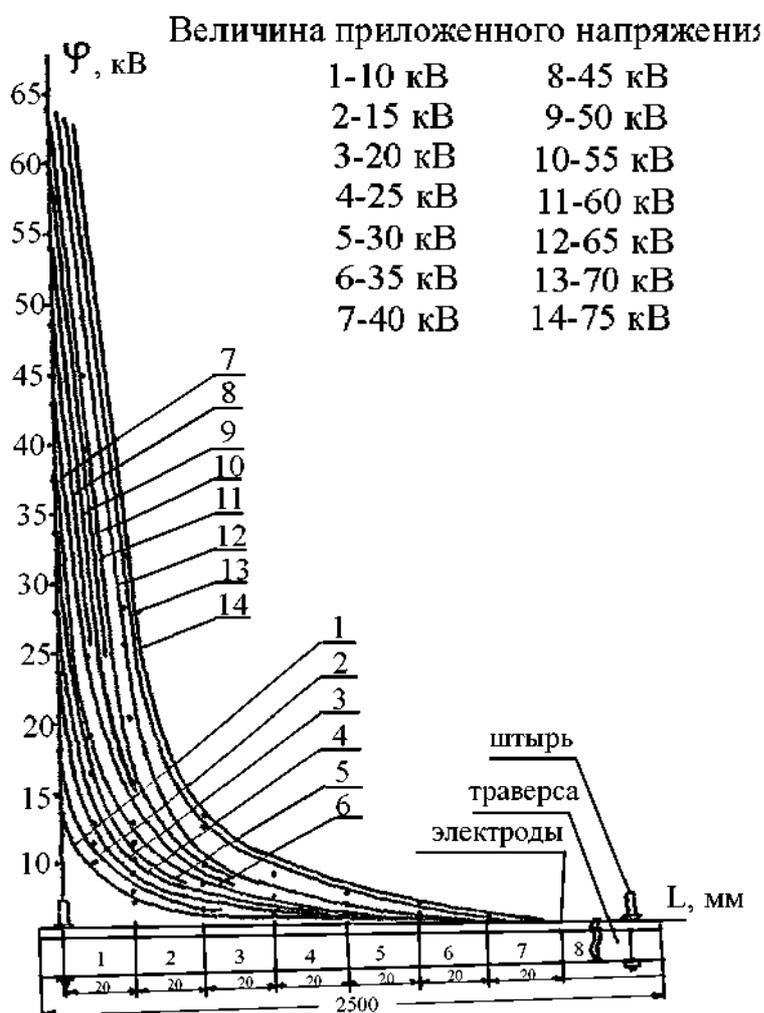


Рис. 50. Схема измерения электрического потенциала по поверхности деревянных траверс

По всей длине траверсы через каждые 200 мм устанавливались электроды, с которых при соответствующем приложенном к траверсе напряжении испытательной установки ИОМ-300/600 с помощью щупа снимались потенциалы. Во время эксперимента воздушно-сухая деревянная типовая траверса смачивалась дистиллированной водой до тех пор, пока ее сопротивление не сравнилось со значением 50-250 кОм. После каждого снятия потенциала, с участков траверсы, она вновь смачивалась водой, и вновь измерялось ее сопротивление.

Результаты усредненных значений распределения потенциала по длине воздушно-сухой древесины траверс, пропитанных консервантом КМ длиной 2500 мм, приведены на рис. 51.



**Рис. 51. Зависимость распределения электрического потенциала по длине воздушно-сухой деревянной траверсы, консервированной препаратом КМ, от величины приложенного переменного напряжения**

К траверсе после ее увлажнения подводилось поэтапно испытательное напряжение в пределах 10-75 кВ. При напряжении 75 кВ и выше древесина траверсы возгорается, и снятие потенциала за-

трудняется, при напряжении 6 кВ снять потенциалы прибором С-100 не представлялось возможным. Увеличение пределов высокого напряжения источника отражалось на росте потенциала, на каждом участке испытываемой траверсы. Однако наибольшее изменение значения его отмечалось на первом 200-миллиметровом участке траверсы. Это характерно для каждого установленного значения приложенного к траверсе напряжения источника. Анализ кривых (см. рис. 51) показывает, что при изменении приложенного к траверсе напряжения в пределах 10-75 кВ значение потенциала на участке траверсы длиной 100 мм изменяется от 2,5 до 50 кВ, то есть меньше в 4 раза при 10 кВ и в 1,5 раза - при 75 кВ относительно исходного напряжения. На участке траверсы длиной 200 мм значение потенциала изменяется от 1 до 3,5 кВ, на участке 1000 мм - в пределах 1,8-2,5, выше 1400 мм потенциал равен 0,1-0,15 кВ.

Распределение потенциала по длине воздушно-сухой траверсы, находившейся в эксплуатации 7 лет, на участке Барса-Кельмес - Ажинияз приведено на рис. 52.

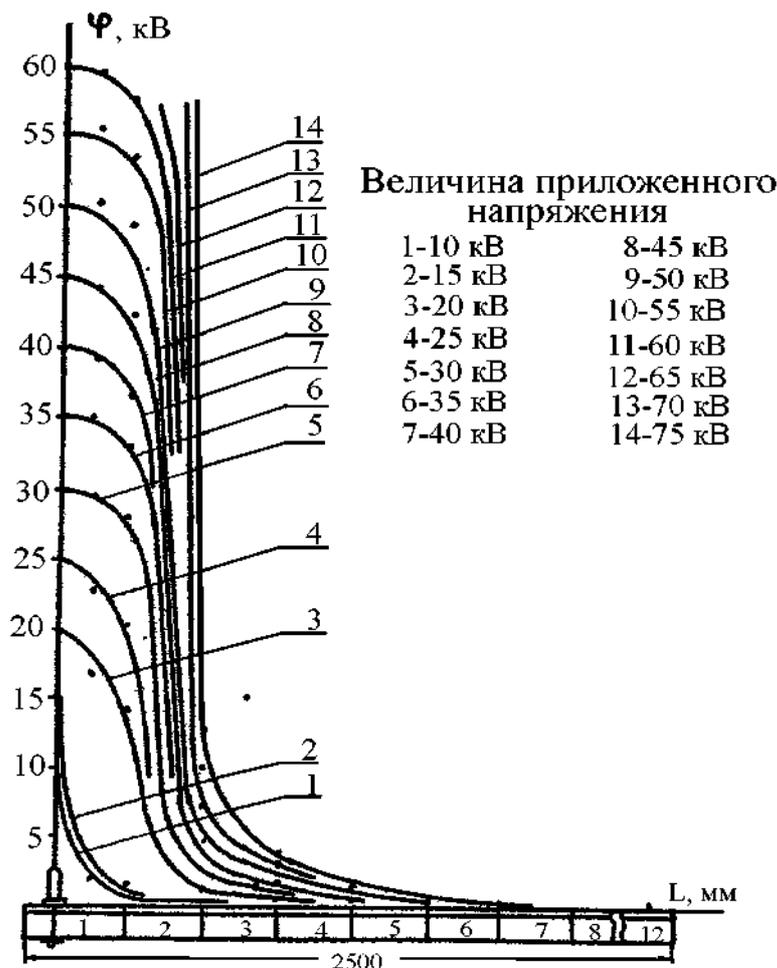


Рис. 52. Зависимость распределения электрического потенциала по длине воздушно-сухой деревянной траверсы, консервированной КМ, от величины приложенного переменного напряжения. Срок эксплуатации траверсы на участке Барса Кельмес - Ажинияз - 7 лет

Анализ кривых показывает, что в пределах испытания приложенным напряжением 10-75 кВ на участках траверсы до 300 мм отмечается замедленное изменение потенциала относительно приложенного. Так, потенциал на участке 100 мм при 10-15 кВ составил 2...2,5 кВ, а далее, с ростом приложенного напряжения до 60 кВ, он уменьшается относительно исходного в пределах 1-20%. На участках длиной 200 мм потенциал составил 5-80%. Таким образом, на участке траверсы длиной 200 мм с увеличением приложенного напряжения величина потенциала приближается к исходной, и чем выше приложенное напряжение, тем меньше потенциал отличается по величине от него. Замедленное изменение в характере распределения потенциала на участке траверсы длиной 300 мм, очевидно, связано с эксплуатацией ее в зоне загрязненной атмосферы, деструкцией древесины и прекращением действия защитного препарата. Потенциал на участках длиной более 1400 мм равен 0,1-0,15 кВ, как и на рис. 51. Потенциал на участке 1000 мм изменяется в пределах 0,5-2кВ.

Синхронизация изменения тока проводимости и потенциала в точке 3 траверсы (400 мм) с динамикой теплового разрушения в процессе испытания отдельно увлажненной траверсы приведена на рис. 53. В течение 120 с на самописце записывалось изменение тока, и фиксировался потенциал. Одновременно визуально наблюдался процесс теплового разрушения древесины. Как видно из кривых, потенциал в течение 60 с практически не изменялся. Затем в течение 60-100 с потенциал резко уменьшался, а ток возрастал до перекрытия по траверсе. На рис. 54 и 55 приведены результаты изменения потенциала по длине траверсы 2500 мм.

Сравним значения потенциалов на рис. 53 и 54. Измерение потенциала, приведенное на рис. 53 производилось на поверхности увлажненной траверсы длиной 400 мм. Характер зависимостей  $\varphi = f(\tau)$  представленных на рис. 54 пологий, чем они резко отличаются от зависимостей  $\varphi = f(\tau)$  на рис. 53. Однако при воздействии приложенного напряжения 25 кВ в течение 90 с при токе 100 мА происходит перекрытие. Сравнение результатов измерений потенциала, приведенных на рис. 53 и 54, показало, что потенциал зависит от величины приложенного напряжения, срока эксплуатации и длины участка испытываемой траверсы.

На рис. 55 кроме зависимостей распределения потенциала по длине увлажненной траверсы приведены и кривые изменения тока проводимости, зафиксированные самописцем одновременно с показаниями потенциала. Увлажнение траверсы изменяет характер кривых распределения потенциала.

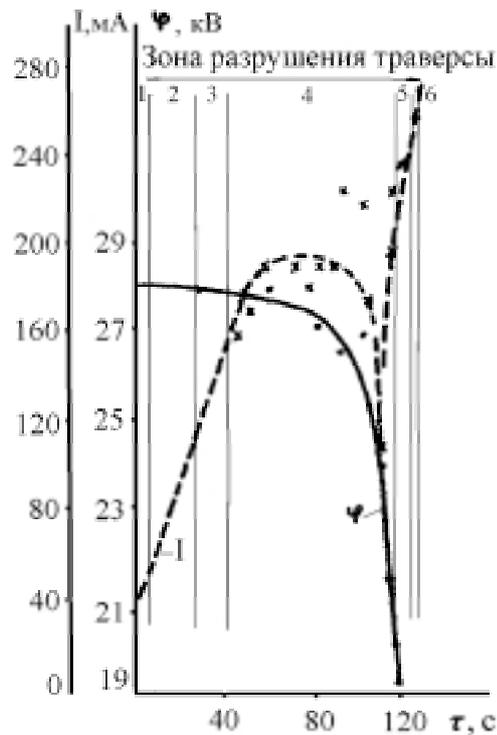


Рис. 53. Характер изменения электрического потенциала и тока проводимости на участке траверсы длиной 400 мм от величины приложенного напряжения, равного 28 кВ: 1 - появление частичных разрядов, 2 - возгорание, 3 - устойчивое пламя, 4 - пожар, 5 - броски тока, 6 - перекрытие по траверсе

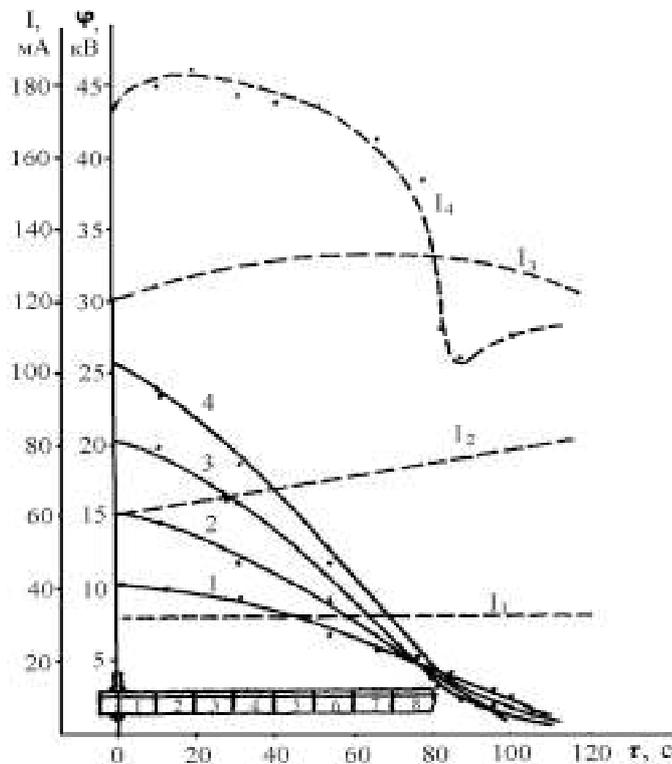


Рис. 54. Характер изменения электрического потенциала и тока проводимости по длине увлажненной траверсы, консервированной КМ от величины приложенного напряжения; 1 - 10 кВ; 2 - 15 кВ; 3 - 20 кВ; 4 - 25 кВ. Срок эксплуатации траверсы на участке Барса-Кельмес - Ажинияз - 7 лет

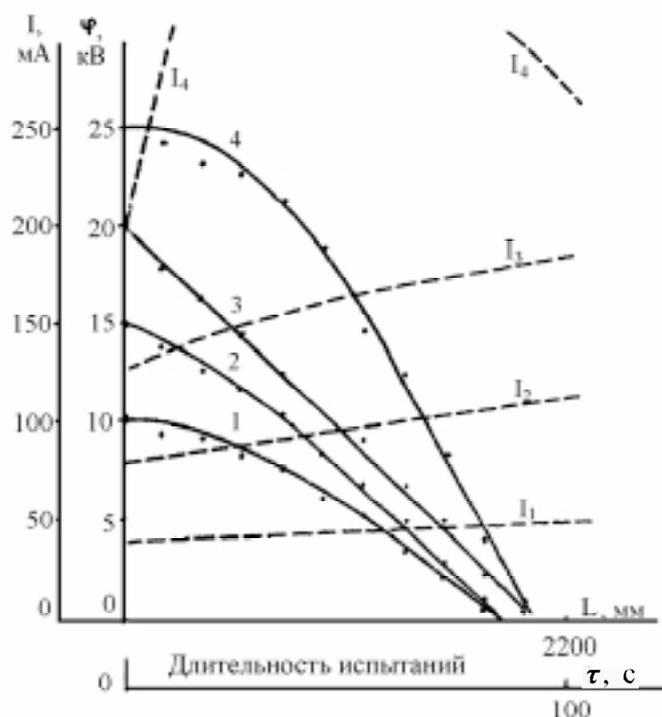


Рис. 55. Характер изменения электрического потенциала и тока проводимости по длине увлажненной траверсы, консервированной КМ, от величины приложенного напряжения: 1 - 10 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ; 4 - 25кВ

На участке траверсы длиной 400мм значения потенциала остаются большими, поэтому на небольшом участке траверсы от электрода, к которому подводится фаза, чаще всего, возникают возгорания и пожары. В результате проведенных испытаний было установлено, что первые очаги возгорания появляются в местах соприкосновения электродов с древесиной траверсы, в тоже время эти места быстрее других сушатся, после чего очаги возгорания перемещаются по всей длине траверсы.

#### 5.4. Механизм разрушения изоляционных конструкций из пропитанной древесины под действием высокого напряжения промышленной частоты

Проблема возгорания древесины воздушных линий от токов утечки, с которой более 50 лет назад столкнулись энергетики, актуальна и в настоящее время. Во-первых, возгорание (тепловое разрушение древесины от приложенного высокого напряжения линий электропередач) всегда завершается существенным экономическим ущербом. Поэтому изучение процессов возгорания древесины способствует решению интересующих производство задач, имеет большое научное и практическое значение [169]. Во-вторых, необходимость таких исследований вытекает из практической и научной

ценности изучения закономерностей взаимодействия древесины с водой при высоком напряжении. Эта сторона проблемы в настоящее время не полностью изучена.

Предпринята попытка накопления экспериментального материала для понимания электрофизических свойств древесины и роли влаги в деревянных конструкциях ВЛ, в формировании токов утечки, теплового разрушения древесины и ограничения электрического воздействия на древесину. Для выяснения воздействия переменного напряжения на изоляционные деревянные конструкции ВЛ и КС были проведены экспериментальные исследования (фото П.3.49, П.3.50). Для изучения процессов, приводящих к возгоранию деревянных элементов ВЛ и КС при эксплуатации были исследованы типовые деревянные траверсы (сосна), широко применяемые в электросетевом строительстве. В программу исследований входило изучение воздействия токов утечки на процесс возгорания траверс с учетом сроков их эксплуатации и средств химической пропитки. Деревянные траверсы испытывались на высоковольтной установке ИОМ 300/600 полигона САО «Электросетьпроект». Установка обеспечивала как плавный подъем напряжения на высоковольтном вводе от 0 до 300 кВ, так и подачу напряжения с помощью разъединителя.

Электрические параметры древесины: токовременные (ТВХ) и вольтамперные характеристики (ВАХ) снимались с участков по древесине траверсы при расстояниях между медными электродами в 200, 400, 600, 800, 1000, 1300, 2300 мм. Для снятия характеристик траверса помещалась в камеру, предварительно пропитывалась до насыщения дистиллированной водой с помощью пульверизатора, подключенного к компрессорной установке. Затем на траверсу подавалось высокое напряжение. ВАХ и ТВХ строились по результатам прохождения токов проводимости по древесине. После каждого замера токов с траверсы снималось напряжение, затем ее обрабатывали водой из пульверизатора. Температура в испытательной камере в течение всего эксперимента составляла 20-25°C.

При снятии ТВХ в эксперименте соблюдались следующие условия: длительность записи токов проводимости при соответствующем напряжении испытания (табл. 19) завершалась устойчивым возгоранием древесины или перекрытием по траверсе; постоянно фиксировалось время появления частичных разрядов (ЧР), возгорания, пожара на траверсе; фиксировались также броски токов и токи перекрытия по траверсе. Напряжение с траверсы снималось после устойчивого её горения.

Результаты воздействия высокого напряжения переменного тока на электрические характеристики деревянных траверс, пропитанных КМ, ХМ, приведены ниже.

Анализ ВАХ (рис. 56) показывает, что они имеют линейный характер. Тангенс угла наклона, который зависит от длины участка испытуемой траверсы; тем большее значение имеет, чем короче траверса.

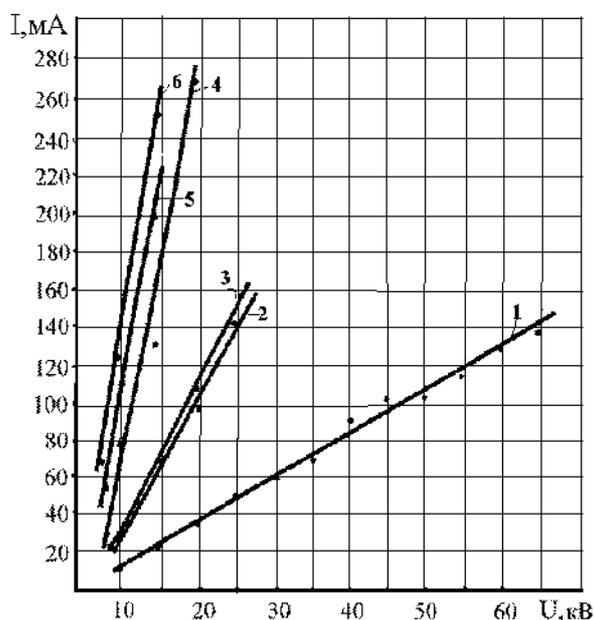


Рис. 56. Вольтамперные характеристики деревянных траверс, консервированных КМ, длиной: 1 - 2400 мм; 2 - 1300 мм; 3 - 1000 мм; 4 - 800 мм; 5 - 600 мм; 6 - 400 мм

Таблица 19

Напряжение, подаваемое на деревянные траверсы

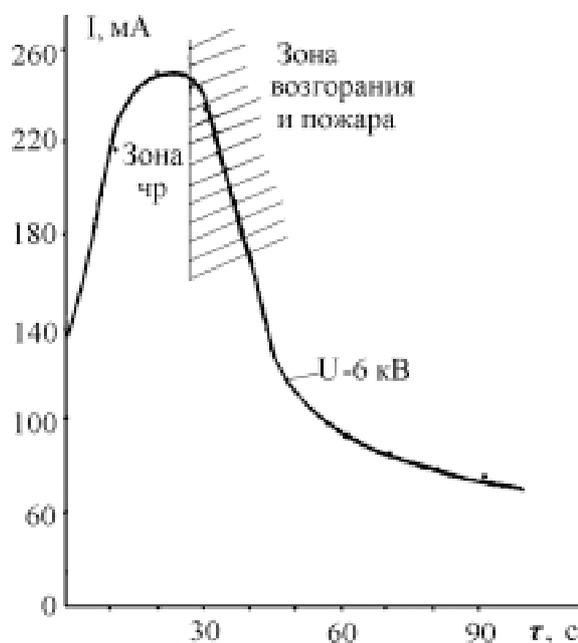
Длина участка траверсы, мм	Напряжение, кВ												
	6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
2300	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1300	+	+	+	+	+	+	+						
1000	+	+	+	+	+	+							
800	+	+	+	+	+								
600	+	+	+	+	+								
400	+	+	+										
200	+	+											

Значение ВАХ также зависит от величины приложенного напряжения. Исследовались токовременные характеристики участков траверс длиной 200, 400, 600, 800, 1000, 1300, 2300 мм.

Кривая изменения тока проводимости по древесине участка траверсы длиной 200 мм во времени при приложенном напряжении 6 кВ приведены на рис. 57. При выдержке под напряжением 6 кВ более 25 с в разных местах участка возникают очаги возгорания, переходящие при увеличении времени нахождения траверсы под напряжением в стадии пожара. Очаги возгорания исчезают с момента отключения подводимого напряжения. Как видно из рисунка, даль-

нейшее нахождение участка 200 мм траверсы под напряжением 6 кВ приводит к значительному уменьшению величины тока, однако, достаточному для ее нагрева и возникновению пожара. В процессе эксперимента в течение первых 10 с подключения к участку 200 мм напряжения 10 кВ происходит быстрое развитие очага возгорания с переходом в пожар. Первые 10 с (рис. 57) сопровождаются, как правило, образованием и развитием в разных местах траверсы, в том числе у электродов, частичных разрядов.

Участки траверс 600 мм неоднократно испытывались под напряжением 20 и 25 кВ, при напряжении 20 кВ и выше участок траверсы либо воспламеняется по всей длине, либо "сразу наступает" перекрытие. Величина тока проводимости, при которой возгорание древесины наступало в первые секунды испытания, превышала 300-350 мА. Особенностью участка испытания траверсы 600 мм является тот факт, что при приложенном напряжении 6 и 10 кВ перекрытия не возникает, процесс возгорания траверсы определяется длительностью нахождения ее под напряжением. Процесс возгорания участка прекращается в большинстве случаев сразу после снятия напряжения. Возгоранию траверсы предшествует появление частичных разрядов, затем - скользящих или бегущих огоньков. Возгорание на значительной длине испытуемого участка траверсы или интенсивное горение участка траверсы у электрода по периметру предшествует пожару.



**Рис. 57. Изменение тока по траверсе длиной 200 мм, консервированной КМ, в зависимости от длительности воздействия переменного напряжения величиной 6 кВ**

Как показали эксперименты, возгорания и перекрытия при приложенном напряжении 6 и 10 кВ к участку траверсы длиной 800 мм

не зафиксировано, но частичные разряды по траверсе имели место. При приложенном напряжении 15 кВ ток проводимости на примере отдельной траверсы, равный 60 мА и более, способствовал появлению частичных разрядов, а через 10-12 с на поверхности траверсы появлялись очаги возгорания. Если и далее увеличивать время приложения напряжения к траверсе до 20-25 с, то огонь быстро распространится по длине участка. При этом ток растет по величине, достигая 160 -170 мА. После небольшого спада (через 75-85 с) наблюдаются броски тока, которые всегда предшествуют перекрытию по траверсе. В момент перекрытия горит 70-90% площади поверхности испытуемого участка траверсы.

Токовременные характеристики участка траверсы длиной 1000 мм приведены на рис. 58.

Следует отметить, что при напряжении 6, 10, 15 кВ перекрытие по траверсе экспериментом не подтвердилось, возгорание, завершающееся пожаром, наблюдается при напряжении в 10 и 15 кВ. Испытание траверс при приложенном напряжении 20 кВ показывает, что у одних опытных образцов перекрытия возникают, у других не наблюдаются. Под действием приложенного напряжения 25 кВ перекрытие по длине траверсы всегда происходит при определенном времени воздействия источника.

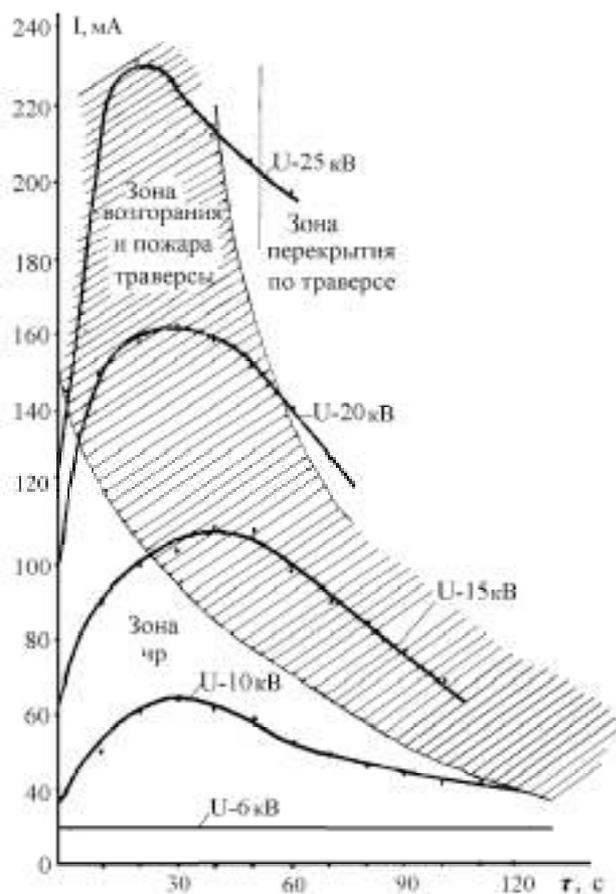


Рис. 58. Изменение тока по траверсе длиной 1000 мм, консервированной КМ, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением

Динамика развития теплового разрушения траверсы показывает, что через 18 с при приложенном напряжении в 20 кВ и токе 100 мА отмечаются частичные разряды, через 35-40 с при токе 130 мА появляются устойчивые очаги возгорания, через 50 с возгорание переходит в стадию устойчивого горения. Далее, если траверса останется подключенной к источнику с напряжением 20 кВ, она со временем сгорит, но перекрытия по длине испытуемого образца экспериментами не установлено. Динамика развития перекрытия по траверсе при приложенном напряжении 25 кВ показывает, что при токе 90 мА через 3 с после подключения ее к источнику на поверхности возникают очаги возгорания. Устойчивое пламя поддерживалось при токе 150 мА через 20 с испытания. Далее ток проводимости по величине падает, но его значение достаточно для продолжения процесса теплового разрушения древесины. Через 40 с и более самописец показывает броски токов, а через 45-50 с наступает перекрытие. Снижение тока проводимости свидетельствует, что древесина подсохла, и ее омическое сопротивление интенсивно увеличивается.

Анализ данных исследования ТВХ траверсы с длиной участка испытания 1300 мм показывает, что при напряжении источника 6, 10, 15 и 20 кВ перекрытия траверсы не происходит. Развитие процесса теплового разрушения древесины при напряжении источника 20 кВ может поддерживаться длительное время при токе чуть более 20 мА. Чем выше приложенное напряжение, тем быстрее протекают стадии частичных разрядов, возгорания, устойчивого пламени, пожара, треков токов и перекрытия.

Результаты исследований ТВХ траверсы с длиной участка испытания 2300 мм, приведенных на рис. 59 показывают, что приложенное напряжение источника к траверсе, равное 6...35 кВ, не приводит к перекрытиям. Однако напряжение в 30, 40, 45, 50 и 55 кВ способствует возникновению частичных разрядов, возгоранию, пожарам и перекрытиям. При приложенном напряжении выше 50 кВ по траверсе в первые 5-10 с во многих местах возникает возгорание, пожар охватывает большую площадь траверсы, появляются броски тока, предшествующие перекрытию. Анализ тока кривых ТВХ показывает, что при малых значениях приложенного напряжения ток проводимости в течение 140 с и более от значения 40 мА практически не отклоняется. Причина следующая: подобные величины токов не могут вызвать сильного нагрева древесины, изменить ее теплового состояния относительно окружающей среды. Следовательно, омическое сопротивление траверсы остается практически неизменным. Увлажненная траверса 2300 мм при большой длительности испытания, приложенным напряжением 6, 10, 15, 20 и 25 кВ и токах проводимости 10-40 мА не подвергается интенсивному тепловому разрушению. Далее степень и скорость теплового разрушения зави-

сят не столько от длительности испытания, сколько от величины напряжения и мощности источника. При напряжении 55 кВ и выше и токах 110 мА и более в первые секунды траверса, пропитанная креозотовым маслом, горит почти по всей длине какой-то узкой полосой, затем пламя распространяется по всей площади. Диаграмма изменения тока проводимости траверсы 2300 мм в зависимости от величины напряжения источника и длительности испытания имеет при малых напряжениях 10 - 25 кВ - вытянутую форму, а с увеличением напряжения приобретает "куполообразную". Затем эта "куполообразная" диаграмма с ростом приложенного напряжения сжимается. В первые секунды нахождения траверсы под приложенным напряжением 60 кВ идет бурное испарение влаги с ее поверхности, увеличивается скорость распространения тепла. Таким образом, скорость изменения таких показателей, как температурное поле, энтропия, омическое сопротивление, ток проводимости, имеет общую закономерность. Отсюда следует, что тепловое разрушение траверсы определяется не величиной тока проводимости, а скоростью его изменения во времени.

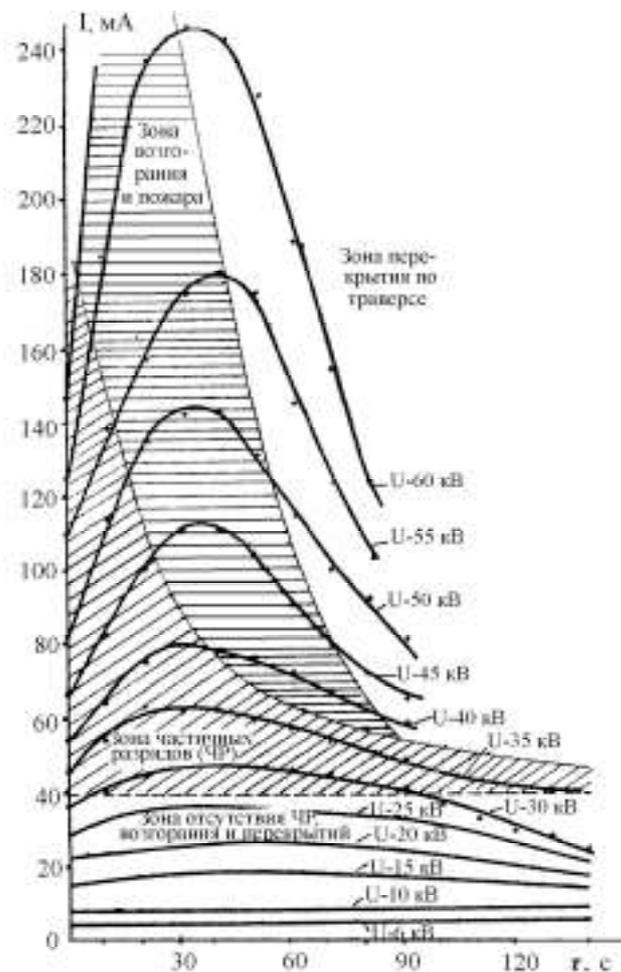
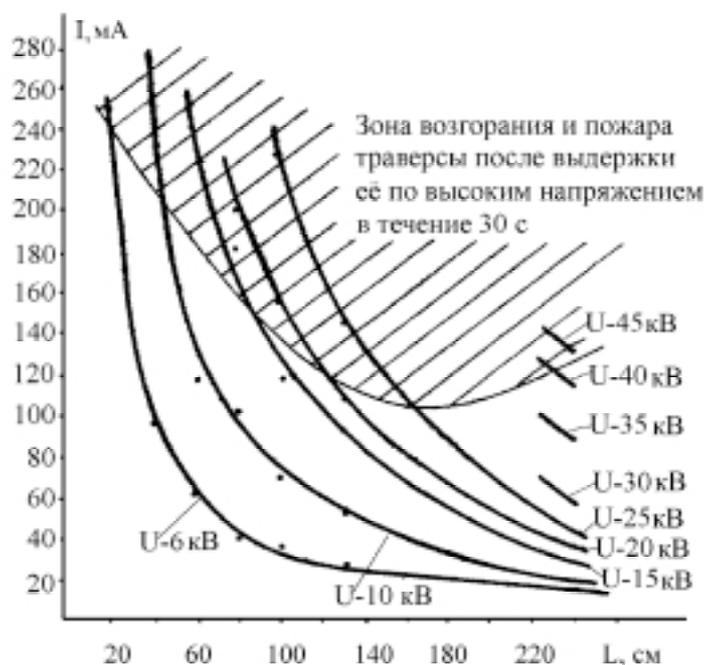


Рис. 59. Изменение тока по траверсе длиной 2300 мм, консервированной КМ, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением

К выводам автора [104] следует добавить, что скорость изменения температурного поля древесины зависит не только от теплофизических свойств и размеров сортимента, температурных условий и продолжительности тепловой обработки, но и от напряжения и мощности источника.

По данным эксперимента построена зависимость тока проводимости от длины участка испытуемой траверсы (рис. 60). Как видно из рисунка, чем меньше длина испытуемого участка, тем меньшее напряжение источника требуется для интенсивного теплового разрушения древесины, и тем большие величины токов проводимости обеспечивают этот процесс.



**Рис. 60.** Усредненные зависимости тока проводимости от длины траверсы, консервированной КМ, при постоянном воздействии переменным напряжением

К аналогичным выводам приходим при рассмотрении кривых, приведенных на рис. 61. Кривые построены по результатам испытания одной траверсы, пропитанной консервантом КМ. Как видно, частичные разряды появляются независимо от длины испытуемого участка траверсы при напряжении источника выше 10 кВ и токах выше 40 мА. Процесс возгорания на участках длиной 200-1300 мм наблюдается при токах выше 60 мА, а на участках длиной 1300-2300 мм - выше 70 мА. Переход процесса возгорания в стадию пожара происходит по длине траверсы при напряжении более 10 кВ и токе около 100 мА. Каждой стадии теплового разрушения (частичные разряды, возгорание, появление пламени, интенсивное горение и др.), как и каждому участку испытуемой траверсы, соответствует определенное напряжение источника питания. Но все стадии теплово-

го разрушения имеют место в указанной последовательности при каждом определенном напряжении испытания.

Большой интерес для практиков представляет вопрос, как изменяются электрические характеристики траверс в процессе эксплуатации. Этот вопрос имеет прямое отношение к повышению надежности ВЛ и правильному выбору химических средств защиты их элементов от термодеструкции. Приведенные результаты испытаний траверс с 7-летним сроком эксплуатации, снятых на участке ВЛ 10 кВ Барса-Кельмес - Ажинияз, консервированных КМ, сравним с результатами испытания новых траверс, защищенных тем же химическим пр



Рис. 61. Зависимости тока проводимости от длины траверсы, консервированной КМ, при постоянном воздействии переменным напряжением



Рис. 62. Усредненные зависимости тока проводимости от длины траверсы, консервированной КМ, при постоянном воздействии переменным напряжением в течение 30 с: 1 - 6 кВ; 2 - 10 кВ; 3 - 15 кВ; 4 - 20 кВ; 5 - 25 кВ; 6 - 30 кВ. Срок эксплуатации траверсы на участке ВЛ Барса-Кельмес - Ажинияз - 7 лет

Сравнивая зависимость тока проводимости от длины траверсы (рис. 60 и рис. 62), можно отметить, что зона возгорания и пожара траверсы, находившейся в эксплуатации 7 лет, после выдержки ее под ВН в течение 30 с определяется токами порядка 40-60 мА, новые же - 120-240 мА.

На рис. 63-65 приведены ТВХ деревянной траверсы различной длины. В кривых ТВХ, снятых при испытании траверсы до перекрытия, просматриваются общие черты в форме изменения. На рис. 63 видим, что возгорание и перекрытие траверсы происходит при 15 кВ. Возгорание наступает при 50 мА в течение 20-30 с выдержкой под высоким напряжением. До перекрытия ток проводимости имеет сложный процесс изменения, после 120 с испытания при токе более 50 мА начинаются броски его, после чего срабатывает защита установки.

На рис. 64 показано, что на участке траверсы длиной 1300 мм при 15 кВ возникают частичные разряды (чр), но для старой траверсы при этом напряжении возможно возгорание (при испытании такие случаи были). Явление частичных разрядов наблюдается при 15 кВ и токах 25-40 мА. При 25 кВ возгорание траверсы наступает при токе 50 мА через 20-30 с с начала испытания.

Если сравнить эти данные, с данными испытания траверсы не находившейся в эксплуатации, то видно, что старые траверсы не располагают защитными свойствами, присущими новым, у них отсутствует консервант КМ. В течение 25-40 с (рис. 64) испытания отмечается падение величины тока с 61 до 48 мА - свидетельство быстрого увеличения поверхностного сопротивления древесины, а далее - резкое увеличение его с 48 до 63 мА. На этом этапе испытания значительная часть траверсы уже горит устойчивым пламенем. Данный участок можно считать участком КЗ. К моменту появления бросков тока (80-85 с) вся траверса по длине горит, большая поверхность ее охвачена пожаром. Броски тока следуют с интервалом 1-2 с, затем наступает перекрытие.

Если сравнить экспериментальные данные для новой траверсы длиной 2300 мм (рис. 59) и бывшей в эксплуатации 7 лет (консервант КМ) той же длины (рис. 65), то можно сделать вывод, что возгорание старой траверсы отмечается при напряжении 20 кВ, в то время как для новой траверсы этот процесс возникает при напряжении 40 кВ. Токи, при которых происходит возгорание старых траверс 40 мА при напряжении 20 кВ, соответствуют токам возгорания новых траверс при напряжении 40 кВ.

Анализ приведенных данных объясняет причину массового возгорания траверс, пропитанных консервантом КМ после 2-3 лет эксплуатации, и глубокие (до 1 см) следы тепловой деструкции древесины траверсы токами утечки после 5-7 лет эксплуатации (фото П.2.25 – П.2.26). Отсюда следует, что на ВЛ 10 кВ в районе Приара-

ля целесообразна установка траверс, пропитанных консервантом КМ, который используется при защите древесины изоляционных конструкций от гниения (за указанное время эксплуатации оно исключено), а от возгорания, следует использовать более эффективные средства химической защиты древесины, свойства которых не оказывает отрицательного воздействия на ее электрические параметры.

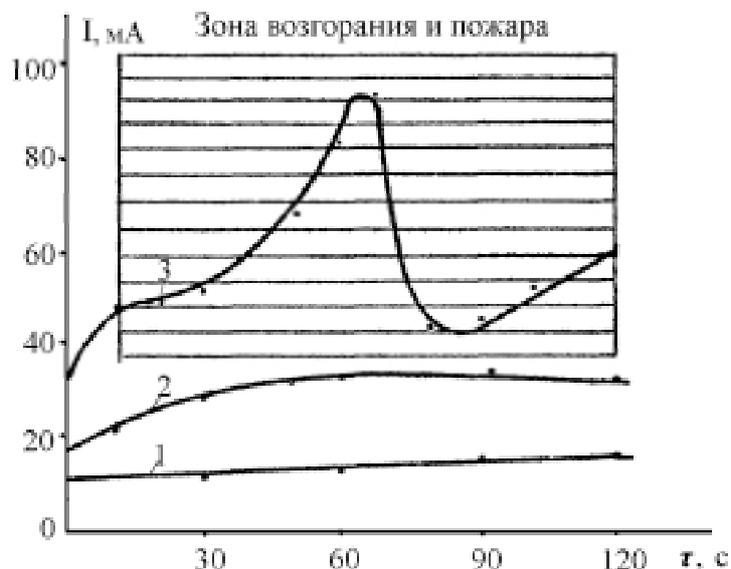


Рис. 63. Изменение тока по траверсе длиной 1000 мм, консервированной КМ, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением: 1 - 6 кВ; 2 - 10 кВ; 3 - 15 кВ. Срок эксплуатации траверсы на участке ВЛ Барса-Кельмес - Ажинияз - 7 лет

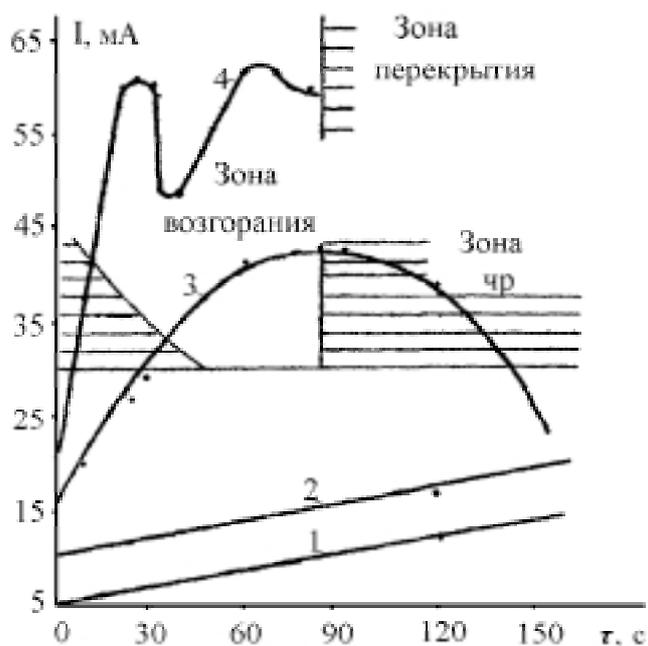


Рис. 64. Изменение тока по траверсе длиной 1300 мм, консервированной КМ, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением: 1 - 6 кВ; 2 - 10 кВ; 3 - 15 кВ; 4 - 25 кВ. Срок эксплуатации траверсы на участке ВЛ Барса-Кельмес - Ажинияз - 7 лет

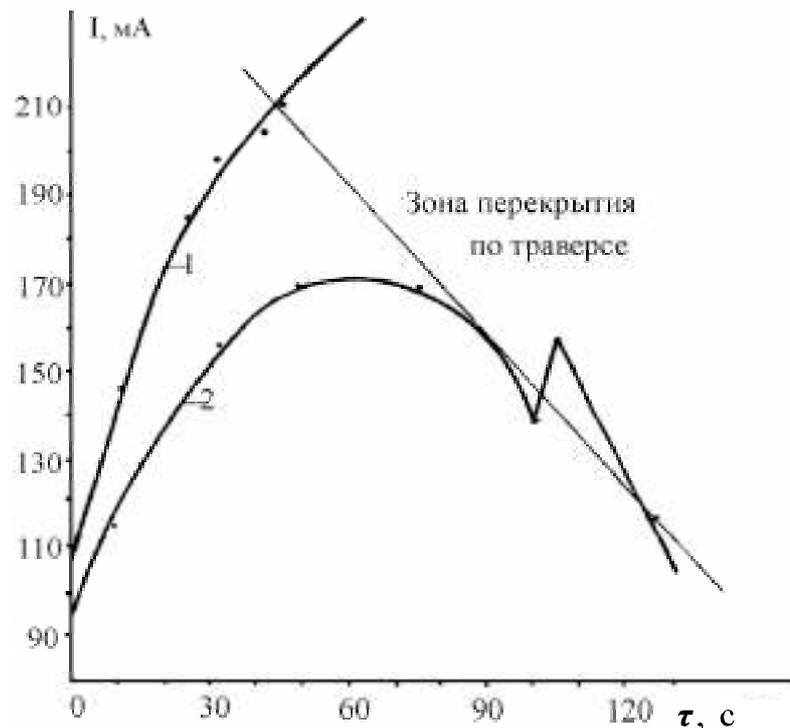


**Рис. 65.** Изменение тока по траверсе длиной 2300 мм, консервированной КМ, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением: 1 - 6 кВ; 2 - 10 кВ; 3 - 15 кВ; 4 - 20 кВ; 5 - 25 кВ. Срок эксплуатации траверсы на участке ВЛ Барса-Кельмес - Ажинияз - 7 лет

В последние года пропиточные заводы МПС и частные фирмы поставляют участкам электроснабжения железных дорог деревянные траверсы, пропитанные различными защитными препаратами. Поэтому представляет интерес изучение электрических параметров таких траверс, установление закономерностей воздействия, влияние высокого напряжения на их свойства, сравнение последних с электрическими параметрами траверс, защищенных другими химическими средствами.

Токовременные характеристики участков траверсы длиной 200 и 400 мм, пропитанной защитным химическим препаратом ХМ-11, приведены на рис. 66; участки эти испытывались под напряжением 6 и 10 кВ. При включении их под напряжение 10 кВ сразу возникают очаги пожара, требующие снятия траверсы с испытаний. Поэтому на рис. 66 приведены кривые ТВХ, снятые при напряжении 6 кВ. Следует отметить, что возгорание участка траверсы длиной 200 мм происходит при 240 мА (см. рис. 57). Возгорание траверсы длиной 400 мм происходит через 100-110 с при токе 150-160 мА.

На рис. 66 хорошо просматривается сдвиг начала процесса возгорания от 30-40 с для траверсы длиной 200 мм, до 100 с - для траверсы длиной 400 мм. Следовательно, длина участка траверсы имеет непосредственное отношение к началу процесса ее возгорания, то есть время начала возгорания при одном и том же напряжении испытания зависит от длины участка траверсы. Можно добавить, что начало возгорания участков траверсы, зависят также от препарата защиты.



**Рис. 66.** Изменение тока по траверсе длиной 200 (1) и 400мм (2), консервированной ХМ-11, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением 6 кВ

Усреднение ТВХ деревянных траверс длиной 2300 мм, пропитанных антисептиком ХМ-11, приведено на рис. 67. Возгорает древесина при напряжении 15-30 кВ и в пределах изменения тока проводимости 110-210 мА. Перекрытие происходит при напряжении 25-30 кВ в первом случае - через 140 с, а во втором - более чем через 25 с. Кривые ТВХ, снятые при напряжении 25-30 кВ, заканчиваются характерным для траверс, консервированных препаратом ХМ-11, S-образным участком. Сравнивая данные результатов испытаний, приведенных на рис. 59 (консервант КМ) и рис. 67, следует отметить, что траверса в первом случае более устойчива к тепловому разрушению токами утечки. Так, возгорание в первом случае происходит при ВН 40-60 кВ и токе 100 мА в пределах 30 с, а во втором при ВН 15-30 кВ и токе 80 мА в пределах 95 с выдержкой под напряжением. Следовательно, несмотря на то, что антисептик ХМ-11 более эффективен при защите древесины от микодеструкции, чем КМ, все же по электрическим параметрам для условий Приаралья нужно отдать предпочтение траверсам, пропитанным КМ.

Экспериментально установлено, что тепловое разрушение древесины траверсы при влажности 90-95% происходит в основном в течение первых 30 с, но время это зависит как от длины участка траверсы, так и от величины приложенного напряжения источника.

На рис. 68 приведена зависимость тока проводимости от длины

траверсы, пропитанной ХМ-11. Как видно для небольших значений высокого напряжения при малой длине участка испытания требуется меньшее время для начала процесса возгорания, но при этом величина тока всегда больше. Из сравнения результатов испытания (рис. 57 и 68) следует, что максимальный ток, равный 250 мА, обеспечивает возгорание траверсы, пропитанной антисептиком КМ, длиной 200 мм при воздействии 6 кВ; траверсы, пропитанной ХМ-11 той же длины - при 200 мА и ВН 6 кВ соответственно.

В эксплуатации увлажненная и загрязненная комбинированная изоляция находится под рабочим напряжением. Сухая же она имеет высокое сопротивление изоляции, на два и более порядка превышающее сопротивление деревянной траверсы.

Увлажнение загрязненных изоляторов и деревянной траверсы приводит к образованию плёнки электролита на их поверхности. Под действием приложенного напряжения ток утечки в поверхностном слое комбинированной изоляция возрастает. Однако вначале сопротивление изолятора остается более высоким, чем у деревянной траверсы. Токи утечки не превышают 1 мА. Выделяемая при протекании тока утечки энергия вызывает нагрев пленки электролита на изоляторе и тем самым вызывает увеличение его проводимости в 1,5-3,5 раза. С ростом температуры из электролита испаряется влага, что уменьшает его проводимость. Эти два противоположных по воздействию процесса определяют величину тока утечки в нем.

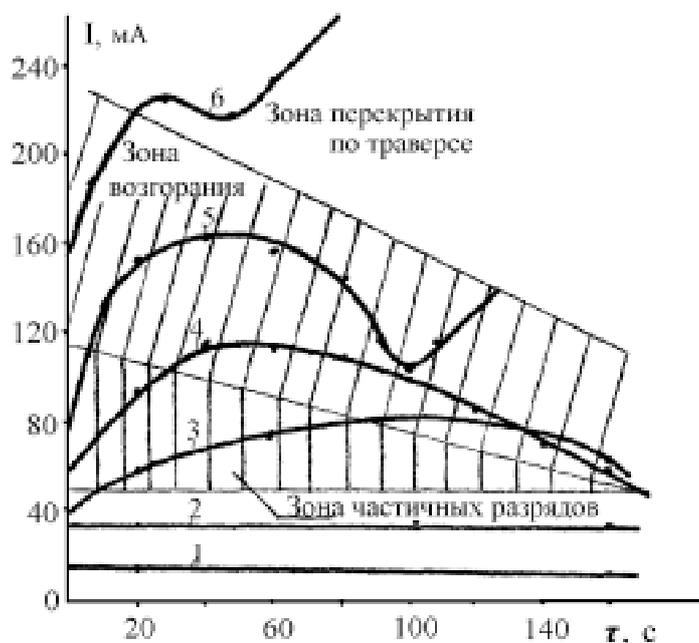
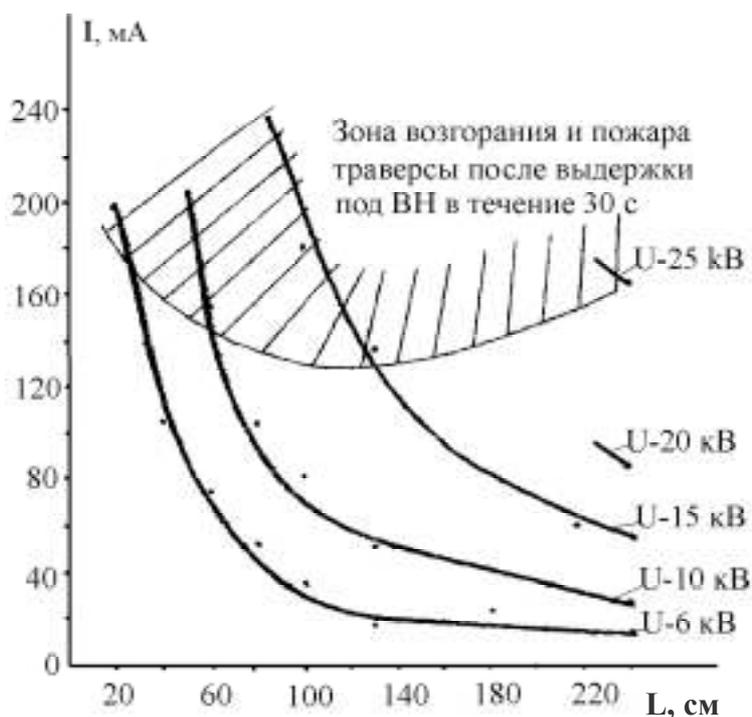


Рис. 67. Изменение тока по траверсе длиной 2300 мм, консервированной ХМ-11, в зависимости от длительности воздействия переменным напряжением: 1- 6 кВ; 2 –10 кВ; 3 - 15 кВ; 4 - 20 кВ; 5 - 25 кВ; 6 - 30 кВ



**Рис. 68.** Зависимости тока проводимости от длины траверсы, консервированной ХМ-11, при постоянном воздействии переменным напряжением

Вследствие неравномерного загрязнения поверхности изолятора, а также переменного диаметра изоляционной детали по длине пути утечки, и различия размеров электродов плотность тока утечки в различных точках поверхности изолятора будет неодинаковой. Для изолятора тарелочного типа, широко используемого на линиях продольного электроснабжения, она у пестика в 3-4 раза выше, чем у шапки. На тех участках, где плотность тока наибольшая, происходит интенсивное испарение влаги, и образуются "сухие" зоны с повышенным сопротивлением. Подсушка в наибольшей степени происходит у электродов изолятора, вследствие чего вокруг них образуются кольцевые "сухие" зоны, с возникновением таких зон связано перераспределение потенциалов по поверхности изолятора. Градиенты напряжения на подсушенных участках становятся достаточными для ударной ионизации воздуха с образованием частичных разрядов. Ток этих разрядов определяется напряжением, приложенным к изолятору, и суммой сопротивлений частичных разрядов и последовательно соединённых с ними частей изолятора. В результате появления таких разрядов снижается общее сопротивление изолятора, которое складывается в основном, из сопротивлений участка изолятора, не зашунтированного дугой, и растекания тока с опорной точки дуги.

В стадии частичных разрядов сопротивление деревянной траверсы становится соизмеримым с сопротивлением изолятора, а токи утечки достигают 10-30 мА и более. Напряжение перераспределяется по всей комбинированной изоляции. Когда "сухая" зона увеличивается до значительных размеров, ток утечки резко уменьшается, что приводит к гашению разряда.

Продолжающееся увлажнение все более растворяет отложившиеся на комбинированной изоляции примеси. Вновь появляющиеся на изоляторе частичные разряды, шунтирующие подсушенные зоны, приобретают дуговой характер. Эта стадия развития разряда называется частичной дугой. При этом резко уменьшается общее сопротивление изолятора. Частичная дуга в процессе своего существования перемещается в поперечном направлении, причем ее опорная точка движется по границе "сухой" зоны. Одновременно она может продвигаться к противоположному электроду.

В результате образования частичной дуги ток утечки по изолятору скачкообразно возрастает до десятков и сотен миллиампер, соответственно увеличивается ток утечки по деревянной траверсе, что при определенных условиях способствует её возгоранию.

Вследствие анизотропии древесины и наличия пороков плотность тока утечки на поверхности траверсы различается, что обуславливает, так же как и на изоляторе, образование "сухих" зон, где визуально наблюдается испарение. На поверхности траверсы возникают шарообразные дуговые образования размером примерно 5 мм, которые перемещаются вместе с границей подсушенного участка. В результате на поверхности траверсы остаются следы перемещения дуги - треки (дефекты).

Длительность существования дуги на поверхности деревянной траверсы определяются энергетическими процессами в дугах на изоляторе. По мере роста тока и длины дуги на изоляторе все большая часть напряжения падает на траверсу. При достижении критической длины канала частичной дуги происходит полное перекрытие изолятора и все напряжение прилагается к сухим участкам траверсы. Энергия, подтекаемая к частичным дугам, возникающим на траверсе, может увеличить их длину до критической, в результате чего произойдет каскадное перекрытие комбинированной изоляции. Однако в эксплуатации чаще всего еще до возникновения частичных дуг происходит возгорание траверсы вследствие достижения критической температуры на отдельных её участках.

Процессы на поверхности загрязненной и увлажненной комбинированной изоляции «фарфор-дерево» определяется не только рабочим напряжением, но и электрическими характеристиками загрязнения, интенсивностью и видом увлажнения, конфигурацией изолятора, видом древесины и её состоянием.

## 5.5. Разработка химической защиты ВЛ 10 кВ продольного электроснабжения

Под системой защиты понимается совокупность химических средств и способов пропитки или обработки деревянных частей опор ВЛ, обеспечивающих при доступных издержках повышенную устойчивость материала, деталей или конструкций в условиях длительной эксплуатации. Разработка такой системы основана на требованиях “Классификации условий службы древесины” и обуславливает проведение изыскания различных защитных средств и соответствующих способов их применения [33]. Система химической защиты позволяет улучшить использование древесины, повысить производительность труда как при эксплуатации, так и в процессе строительства новых ВЛ, обеспечить требуемый уровень надежности распределительных сетей. Для практического руководства по организации мер защиты деревянных изоляционных конструкций ВЛ и КС разработана такая система (рис. 69).

Рассмотрим характеристики составляющих системы химической защиты древесины:

1. **Объект защиты** - опоры и траверсы на участке ВЛ 10 кВ и изоляционные поддерживающие конструкции контактной сети. Условия эксплуатации древесины ВЛ и КС разнообразные, поэтому вероятность и скорость разрушения от токов утечки как стойки, так и ее отдельных элементов (деталей) в основном зависят от тепло-влажностных условий, определяющих техническое состояние поверхности древесины. Класс службы объекта защиты - ХП; срок службы - 35-50 лет; защитное средство: КМ, ХМ-11, ПХДСТ, ХМФС и др.; вымывание умеренное III степени; период биоразрушения - до 6 мес. и т. д. [33]. На рис. (рис. 69) представлена структурная схема химической защиты деревянных изоляционных конструкций участков КС и ВЛ 10 кВ продольного электроснабжения от различных видов деструкции.

2. **Условия деструкции древесины** определяются почвенно-климатическими особенностями региона эксплуатации, природоохранными и санитарно-техническими аспектами, экологической ситуацией окружающей среды, экологией биодеструктора, породой древесины, механическими факторами и др.

3. **Виды деструкции древесины**: термодеструкция (воздействие токов утечки на древесину), биоповреждения (лихенодеструкция), трещины усушки. Анализ и обобщение накопленного практического опыта эксплуатации ВЛ 10 кВ позволили выдвинуть эколого-технологическую концепцию биоповреждений деревянных опор ВЛ, согласно которой они рассматриваются как реакция окружающей среды и биосферы на деятельность человека.

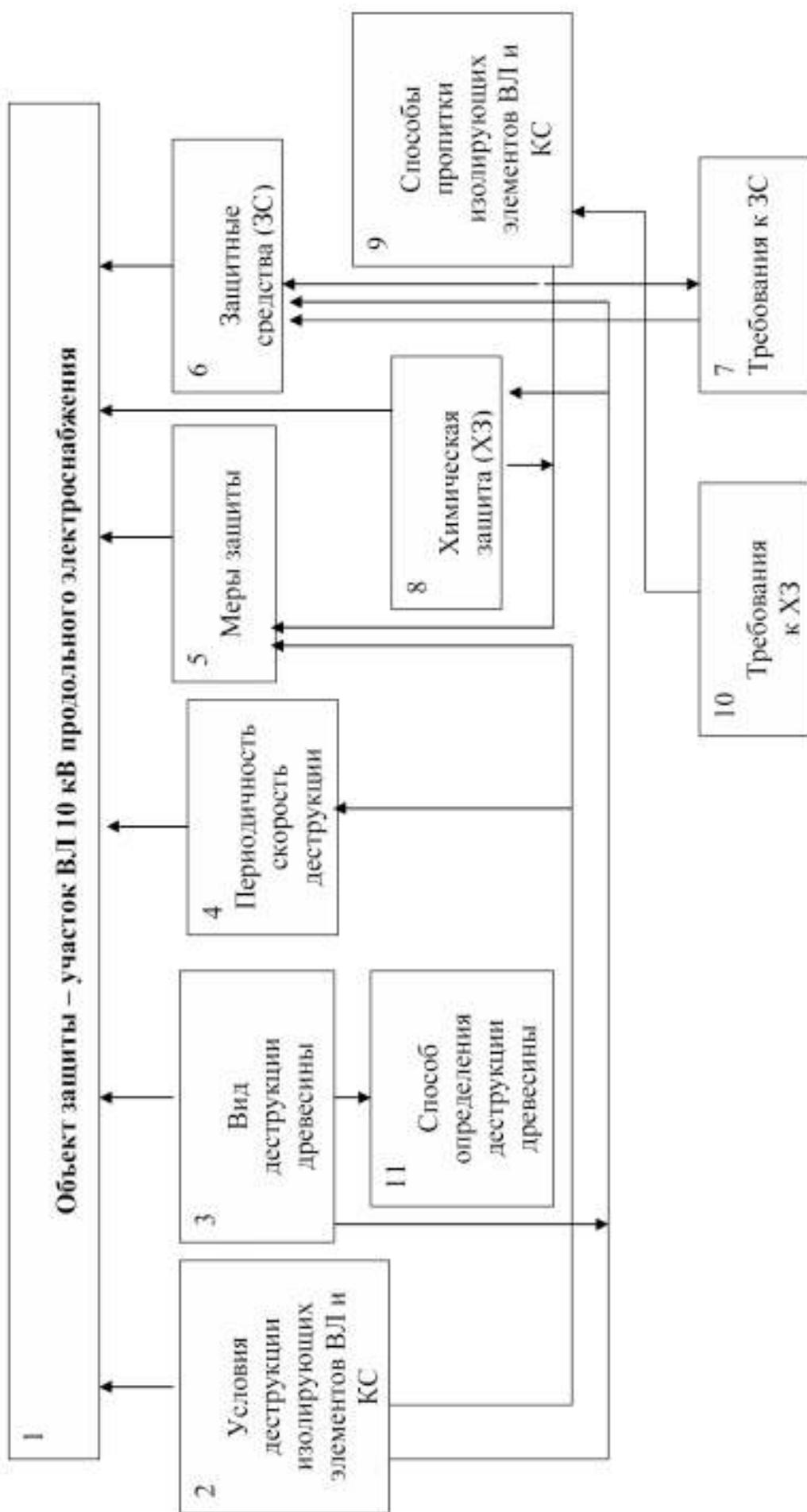


Рис. 69. Структура системы защиты деревянных изоляционных конструкций участков ВЛ 10 кВ продольного электроснабжения железных дорог

**4. Периодичность и скорость разрушения** взаимосвязаны с влажностью режима и определяются на основании изучения опыта эксплуатации элементов ВЛ, их технического состояния, результатов научных исследований. Скорость разрушения древесины траверс и опор ВЛ 10 кВ в регионе Приаралья от воздействия токов утечки составляет 2 см в глубину за 12-15 лет на участке Заравшан-Самарканд, а от микодеструкции 3-5 см за 20-30 лет; на участке Дорт-Кую Рзд. 69 от термитов 5-7 см за 12-15 лет; на участке Айдин-Небитдаг от химической деструкции 5-7 см за 10-15 лет.

**5. Меры защиты** во всех случаях при обеспечении определенной продолжительности срока службы возводимых ВЛ или увеличения его для действующих объектов электросетевого строительства необходимо проведение рациональной строительной или ремонтно-эксплуатационной защиты с применением конструкционных и химических мер. Конструкционные меры заключаются в эффективном использовании клееной древесины при проектировании опор ВЛ. Химические меры заключаются в обработке древесины опор консервантами. Защита ее от воздействия токов утечки (возгорания) достигается пропиткой химическими веществами антипиренами.

**6. Защитные средства** - химические вещества или препараты, предохраняющие древесину от биоразрушения, возгорания от токов утечки и низовых пожаров, увлажнения и других нежелательных воздействий. Выбор защитных средств осуществляют согласно ГОСТ 20022.0-76 "Древесина. Консервирование. Объекты защиты и параметры защищенности".

**7. Требования, предъявляемые к защитным средствам,** сводятся в основном к следующему: обеспечить био- и огнестойкость древесины, хорошо проникать в нее, не ухудшать физико-технических свойств ее, не вымываться из древесины, не корродировать металлы. Так как био- и огнезащита достигаются чаще всего введением в древесину химических средств, не всегда безразличных для человека и окружающей среды, поэтому при соблюдении элементарных правил ТБ они должны быть безвредными.

**8. Химическая защита** способна увеличить срок службы деревянных изоляционных конструкций, придавая ей биостойкость и невозгораемость от токов утечки на длительный срок. Пропитка древесины может придать ей необходимые качества, сохраняющиеся достаточно длительное время без заметного изменения свойств.

Условия службы древесины ВЛ, влияющие на её долговечность, определяются особенностями конструкции и эксплуатации. Оценка этих условий в отношении влияния на термодеструкцию должна производиться с учетом взаимосвязи почвенно-климатических особенностей обследуемого региона. При исследовании этого вопроса объекты ВЛ 10 кВ по характеру и скорости деструкций древесины были разделены на зоны интенсивно-периодического и непрерывно-

го разрушения. В первом случае разрушение протекает более интенсивно и непрерывно в определенные периоды года (весна и осень – периоды возгорания опор в загрязненных районах), во - втором - разрушение древесины токами утечки происходит непрерывно в течение года. При этом важно выделить в изоляционной конструкции характерные места, неизбежно увлажняемые в процессе эксплуатации.

При разработке системы защиты деревянных опор ВЛ 10 кВ персонал дистанций электроснабжения прежде всего должен представлять себе, от какого разрушения предполагается защищать изоляционные конструкции, что содействует или мешает их разрушению, каковы вероятность и скорость разрушения, на какой срок необходимо защитить древесину, требования, предъявляемые к защищаемому объекту в целом и отдельным его деталям, допустимую выборочную и дифференцированную защиту, допустимые удельные или общие денежные расходы.

Химическая защита подразделяется на длительную и временную, полную и частичную, выборочную и дифференцированную. Длительную или временную защиту древесины ВЛ от био- и огне-разрушения применяют для отдельных частей или элементов изоляционных конструкций ВЛ и КС. Длительная защита обеспечивает большой срок службы опор ВЛ, временная -осуществляется на период повышенной опасности возникновения биоразрушения, появления больших токов утечки (при повышенной влажности в осенний и весенний сезоны, колебаниях температуры воздуха, туманах и др.). Средства временной защиты применяют как заблаговременно для профилактики био - и огнеповреждений, так и в случаях интенсивного их развития. Для временной защиты поверхности элементов конструкций ВЛ обрабатывают биоцидами (антисептиками), антипиренами или комплексными био- и огнезащитными средствами. В зависимости от условий и необходимости химическая защита может быть полной, касающейся всего участка ВЛ, или частичной, относящейся к отдельным опорам или даже деталям (элементам). Полная защита древесины от возгорания токами утечки очень дорога и не всегда оправдывается, частичная более доступна и обычно может быть выполнена в комплексе с защитой от биоразрушения. Поскольку в различных местах поверхности траверс и стоек ВЛ условия разрушения древесины неодинаковы, они нуждаются и в разной степени защиты. Например, наклонно и горизонтально установленные детали опор ВЛ гниют быстрее, чем вертикальные. Поэтому они должны быть защищены более капитально. Необходимый уровень (степень) защищенности древесины опор ВЛ от разрушения рассчитывается исходя из условий и оптимальной продолжительности их службы, которые оцениваются с учетом вероятности и скорости возможного разрушения. Применение дифференцированной

защиты представлено на фото П.3.51-П.3.60 в соответствии с вероятностью и скоростью разрушения отдельных частей объекта, даже с учетом возникших в этом случае организационных затруднений весьма выгодно.

**9. Способы пропитки** деревянных опор ВЛ в условиях эксплуатации. Диффузионная пропитка (ГОСТ 20022.10-83) предусматривает четыре варианта: нанесение антисептика (антипирена) на поверхность - диффузионная выдержка, гидроизоляция, пропитка бандажированием и нанесение антисептика (антипирена) на поверхность без диффузной выдержки. На поверхность сырой древесины наносят пасты или концентрированные растворы защитных средств и выдерживают ее в условиях, исключающих высыхание. Упрощенные способы пропитки: вымачиванием (ГОСТ 20022.12-81); нанесением на поверхность. Для пропитки опор ВЛ первым способом предложено использовать так называемую подставную ванну. В условиях эксплуатации ВЛ пропитка древесины механизмуется с помощью гидропультов, опрыскивателей и краскопультов различных систем.

«Лаборатория защиты древесины ЦНИИМОД» продолжает исследовательские работы по созданию отечественных автоклавных установок. До 1985 г. в России для пропитки водорастворимыми препаратами использовали импортное оборудование [36]. В 1985 г. в Архангельске разработали и создали автоклавы пяти типоразмеров: проходного типа диаметром 2,6 м, длиной 36, 30, 24 и 18 м и тупикового типа диаметром 2 и длиной 8 м. На базе автоклава проходного типа построили специализированный участок глубинной пропитки в деревообрабатывающем цехе [37]. В 2000 г. в Архангельской области изготовили цилиндрический автоклав проходного типа, который имеет массу 30 т, внутренний диаметр 2 м, рабочую длину 19 м, вместимость 60 м<sup>3</sup>, толщину стальных стенок 18 мм. Этот автоклав использовали при строительстве шпалопропиточного завода ОАО межрегиональной компании «Белкомур». Завод разместили в поселке Ясный Пинежского района Архангельской области, где производятся работы по пропитке шпал, переводных брусев, опор и изолирующих конструкций, строительных деталей и станционных построек для строящихся объектов новой железнодорожной магистрали Карпогоры- Вендинга, которая кратчайшим путем соединит Архангельский морской порт на Белом море с Республикой Коми и Уралом [38, 39].

В настоящее время «Лаборатория защиты древесины ЦНИИМОД» проводит производственные испытания сборно-разборной модульной автоклавной установки для защитной пропитки древесины водорастворимыми препаратами. Диаметр автоклавной камеры – 1,8 м, длина 12,5 м [40]. Установка укомплектована резервной емкостью для перекачки раствора, участком приготовления рабочих

растворов с электрической мешалкой, насосом высокого давления, вакуум-насосом, емкостью для воды.

Технологические режимы пропитки в автоклавных установках зависят от многих факторов - породы древесины, габаритов изделий, требуемой глубины пропитки и т. д.

Введение установок в эксплуатацию в производственных условиях дорогостоящая процедура и занимает много времени. В связи с этим «Лаборатория защиты древесины ЦНИИМОД» совместно с АГТУ проводит исследования по математическому моделированию технологического процесса пропитки древесины с использованием вакуумирования изделий для удаления воздуха из поверхностной зоны [41], с последующей подачей рабочего раствора и создания избыточного давления 10- 12 атм. [42] в течение требуемого времени. После удаления рабочего раствора из автоклава в камере создают вторичный вакуум, в процессе которого из поверхностной зоны пропитанных изделий удаляется избыток раствора [43]. В результате чего с пропитанных изделий не стекает раствор, что имеет большое значение с экологической и экономической точек зрения. При пропитке в автоклавах защитные растворы циркулируют в замкнутой системе автоклава, резервной ёмкости и трубопроводам, что исключает потери дорогостоящих биоактивных препаратов и поэтому эта технология экологически выгодна.

**10. Требование, предъявляемые к способам защиты:** их эффективность, оцениваемая лишь с учетом особенностей защитных средств; производительность, доступность и безопасность; экологичность и др.

В последние годы «Лаборатория защиты древесины ЦНИИМОД» проводит интенсивные исследования по оптимизации рецептуры [44 - 46] многокомпонентных водорастворимых средств защиты древесины с улучшенными экологическими свойствами [47, 48].

Средства защиты древесины для производственного применения обычно выбирают эмпирически на основе дискретного анализа их различных экологических, технологических, эксплуатационных и экономических характеристик. Для решения этой задачи разработан метод оптимизации выбора водорастворимых средств защиты на основе комплексного обобщенного показателя, учитывающего в количественном выражении их разнородные характеристики [49], полученные по оценкам независимых экспертов.

**11. Способы установления вида разрушения древесины:** натуральный осмотр деревянных элементов ВЛ и КС; использование специальных приспособлений, радиационный, акустический и др.

Следует отметить, что профилактика - это самое простое и экологически выгодное мероприятие в борьбе с разрушением древесины ВЛ 10 кВ от грибов, термитов, воздействия токов утечки, коррозии железобетонных изделий и др.

## 5.6. Оценка ожидаемого числа возгораний деревянных элементов опор линий продольного электроснабжения

В последнее десятилетие внимание широкого круга специалистов привлечено к проблеме Арала. Уменьшение акватории Аральского моря явилось не только настоящим экологическим бедствием, но и поставило множество проблем по совершенствованию методов эксплуатации линий продольного электроснабжения.

Условия эксплуатации наружной изоляции, как и условия загрязнений в различных районах страны чрезвычайно разнообразны. Они зависят от происхождения пыли, её концентрации в атмосфере и метеорологических условий. Перекрытия загрязненной комбинированной изоляции «фарфор – дерево» является для многих энергетических систем и предприятий серьезной проблемой её выбора для условий данного загрязнения [170]. Очень важно, поэтому разработать классификацию условий загрязнений комбинированной изоляции. Физическая сущность явлений на поверхности изоляции «фарфор – дерево» рассматривалась для типа загрязнений присущих региону Приаралья. Наибольшее значение придавалось физико-химическому строению и концентрации загрязнений. Количественный и качественный состав загрязнений определялся рентгенографическим анализом на фото П.3.33-П.3.48 и результатами исследований табл. 18. Электрономикроскопический анализ загрязнений на поверхности древесины траверс позволил зафиксировать частицы пыли в межволоконном пространстве, ответственных за интенсивность развития тока утечки, перекрытия по траверсе. Этими данными должны начинаться требования классификации условий загрязнений. В отличие от изолятора процесс разряда или перекрытия по древесине кроме следующих параметров: проводимость сухого и влажного отложений, теплопроводность отложений, гигроскопичность отложений, определяется концентрацией химических составов отложений антисептиков (консервантов) и антипиренов. Разряды и перекрытия по траверсе определяются и содержанием невымывающихся из древесины компонентов защитных средств. Этот процесс разряда по комбинированной изоляции «фарфор - дерево» развивается по нескольким вариантам: разряд по изолятору развивается одновременно (или синхронно) с возгоранием и пожаром древесины; разряд по изолятору синхронно сопровождается бросками тока (они характерны только для древесины), а иногда взрывами пламени по длине траверсы; процесс разряда по изолятору визуалью не фиксируется; но тепловое разрушение пламени резко прекращено; фиксируется вспышка-дуга по изолятору и пламя по траверсе. И последний вариант, ответственный за появление на траверсах многочисленных треков, визуалью разряд по изолятору или перекрытие не фиксируется, но под действием рабочего напря-

жения по комбинированному изолятору (полупроводнику) протекает ток, при длительном воздействии которого происходит термическое разложение древесины фото П.3.49, П.3.50.

Считая, что тепловые процессы в пленке загрязнений играют решающую роль в распределении разрядного напряжения комбинированного узла, так как с ними связаны движение и образование дуги и следующие за ним перекрытие, то в соответствии с этим перед испытанием на изолятор наносился увлажняющийся полупроводниковый слой бентанита.

Для анализа процесса перекрытия было произведено фотографирование развития разряда, начиная с частичных дуг до полного перекрытия комбинированной изоляции при различных состояниях траверсы фото П.3.49, П.3.50.

Особенностью линий продольного электроснабжения является применение в основном деревянных траверс и опор, что в нормальных условиях эксплуатации существенно повышает надежность электроснабжения железных дорог. Район Аральского моря всегда отличался тяжелыми условиями эксплуатации линий электропередачи и линий продольного электроснабжения 10 кВ. Не менее остро стоит эта проблема на линиях продольного электроснабжения, эксплуатируемых вблизи Каспийского моря, а также участки железных дорог, где широко распространены пухлые солончаки. Это связано с тем, что почвы в этих районах содержат большое количество хлоридов и сульфатов. С резким уменьшением акватории Аральского моря еще более ухудшились условия эксплуатации ВЛ, что объясняется увеличением не только площадей засоленных земель, но и появлением массивов пухлых легко развиваемых ветром солончаков [171, 172].

При пыльных бурях соль, поднимаемая ветром, забивает трещины в деревянных опорах, агрессивно воздействуя на металлические элементы электрооборудования, разрушает пасынки и фундаменты опор; оседает на штыревых изоляторах, существенно снижая надежность электроснабжения электрических железных дорог, принося большой народно-хозяйственный ущерб [52, 171 - 175].

Настоящим бедствием в этих районах являются возгорания опор, которые часто сопровождаются падением провода на землю. Можно назвать две основные причины возгорания деревянных опор: гроза и токи утечки по поверхности траверс. Однако опыт эксплуатации линий продольного электроснабжения показывает, что возгорание деревянных опор из-за токов утечки более частое явление в этих районах, чем из-за грозы. В связи с этим большой практический интерес представляет оценка числа возгораний в течение года на 100 км, которая может служить критерием необходимости разработки своевременных экономически оправданных мер по повышению надежности электроснабжения электрических железных дорог [174, 176-178].

Снижение электрической прочности поверхности древесины траверс обусловлено осевшими на ее поверхность хлоридами и сульфатами, хорошо растворимыми в атмосферных осадках. Образование электролита на поверхности, его различное проникновение в поры и трещины ведет к перераспределению на ее поверхности градиента напряжения. В местах с большой плотностью тока происходит подсушка поверхности древесины, образуются подсушенные зоны, к которым приложено все напряжение. Это вызывает существенное повышение градиента напряжения на подсушенных участках древесины и, как следствие, к появлению частичных разрядов, шунтирующих по воздуху подсушенные зоны. Это обуславливает повышение температуры на этих участках древесины и ее возгорание.

В результате обследования большого количества опор было выявлено несколько типов дефектов (рис. 47), ослабляющих диэлектрические свойства древесины опор и траверс.

Широко распространенным дефектом, наиболее ослабленных мест является участок древесины вблизи укосин и штыря, показанный на фото П.3.17, П.3.20, П.3.22, П.3.23. Именно на этом участке зафиксирован самый высокий градиент напряжения. В связи с этим представляет интерес исследовать зарождение и поведение разряда на этом участке. Исследования показали, что через 5-7 лет эксплуатации вблизи штыря и крепления укосины скапливается зола, которая при увлажнении хорошо смачивается. В увлажненном состоянии, в смеси с хлоридами и сульфатами она является хорошим проводником. Измерения токов утечки на данном участке показали, что на траверсах токи утечки достигают 60-100 мА, а поверхностное сопротивление снижается до 50 кОм. Таким образом, вероятность возгорания траверсы будет определяться вероятностью появления "опасного" градиента на этом ослабленном участке. Поэтому при разработке методики оценки числа возгораний необходимо учесть вероятностный характер изменения состояния древесины на этом ослабленном участке, от которой зависит распределение потенциала.

Если представить линию (или участок) с числом деревянных опор  $m$  как систему с независимыми элементами (возгорания опор происходят независимо друг от друга), а также принять, что возгорание одной опоры ведет к нарушению электроснабжения, то вероятность нарушения электроснабжения  $P_i$  будем принимать как возгорание хотя бы одной опоры. Тогда вероятность того, что одна опора не загорится, определится как  $1 - P_i$ , а вероятность того, что ни одна опора на участке не загорится, равна произведению вероятностей не возгорания всех опор на участке

$$1 - P_m \cdot (E_{mp}) = \prod_{i=1}^m [1 - P_i \cdot (E_{mp})], \quad (84)$$

где  $P_m (E_{mp})$  - вероятность возгорания хотя бы одной опоры на участке.

Из этой формулы определим вероятность  $P_m(E_{mp})$

$$P_m \cdot (E_{mp}) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i \cdot (E_{mp})]. \quad (85)$$

Если считать, что условия возгорания всех опор на участке одинаковы, то вероятность  $P_m(E_{mp})$  можно найти проще

$$P_m \cdot (E_{mp}) = 1 - [1 - P_i \cdot (E_{mp})]^m \quad (86)$$

или

$$P_m \cdot (E_{mp}) = m \cdot P_i \cdot (E_{mp}). \quad (87)$$

При расчете вероятности возгорания одной опоры необходимо учесть, что в нормальных условиях эксплуатации происходят колебания рабочего градиента напряжения и, кроме того, колебания в зависимости от состояния поверхности древесины траверсы.

Если принять, что колебания рабочего градиента напряжения на поверхности траверсы в зависимости от ее состояния описывается нормальным законом распределения

$$P_i(E_{mp}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-[E_{mp} - \bar{E}_{mp}]^2 / 2\sigma_1^2} dE_{mp} = F \left[ \frac{E_{mp} - \bar{E}_{mp}}{\sigma_1} \right]. \quad (88)$$

где  $E_{mp}$  – градиент напряжения, при котором возможно возгорание;  $\sigma_1$  – среднеквадратичное отклонение нормального распределения  $P_i(E_{mp})$ ;  $\bar{E}_{mp}$  – 50% градиент напряжения;  $F$  – функция нормального распределения;

то для вероятности  $P_m(E_{mp})$  получим следующее выражение

$$P_m(E_{mp}) = mF \left[ \frac{E_{mp} - \bar{E}_{mp}}{\sigma_1} \right]. \quad (89)$$

Введем понятие коэффициента состояния древесины на ослабленном участке как отношение градиента напряжения в реальных условиях  $E_{mp}$  на ослабленном участке при увлажнении и загрязнении к градиенту напряжения чистой сухой древесины в нормальных условиях эксплуатации  $E_n$

$$K_c = \frac{E_{mp}}{E_n}. \quad (90)$$

С учетом этого выражение (89) преобразуется к виду

$$P_m(K_c) = mF \left[ \frac{1 - K_c}{C_1 K_c} \right]. \quad (91)$$

где  $C_1$  – коэффициент вариации распределения Лапласа.

Если представить вероятность  $P_m(K_c)$  в виде

$$P_m(K_c) = \frac{n}{N}, \quad (92)$$

где  $n$  – число возгорания древесины на ВЛ;  $N$  – число увлажнения древесины в конкретных условиях;

а также перейти к его оценке при наихудшем состоянии древесины, т.е. когда коэффициент состояния древесины стремится к минимуму  $K_{c\ min}$ , то для расчета числа возгорания опор можно получить следующее выражение

$$n = NmF \left[ \frac{1 - K_{c\ min}}{C_1 \cdot K_{c\ min}} \right]. \quad (93)$$

Для оценки числа возгорания опор по этой методике был взят Кунградский участок железной дороги, где собран достаточно полный материал по эксплуатации опор, а также проведены исследования и измерения градиента напряжения на ослабленном участке между штырем и укосиной.

Сведения об опыте эксплуатации опор и траверс были собраны за период 1984 - 1998 г.г. (табл. П.1.1, П.1.3). Ожидаемое число возгораний, рассчитанное по данным, представлено в табл. 20. Выявлены случаи возгорания опор при отсутствии грозы. Анализ этих случаев показывает, что возгорания опор в основном происходят в весенне-осеннее время, когда есть атмосферные увлажнения. Для каждого рассмотренного участка рассчитано многолетнее число возгораний на 100 км в год. Измерения коэффициента состояния древесины на участках железной дороги в Приаралье показали, что коэффициент вариации колеблется в пределах от 0,07 до 0,11; а коэффициент состояния древесины от 1,2 до 1,6. Число увлажнений в этом районе равно десяти.

Таблица 20

**Расчетное ожидаемое число возгораний опор в Приаралье**

Наименование участка ВЛ 10 кВ	Кол-во опор на участке	Кол-во увлажнений	Удельное число возгораний опор На 100 км в год		Коэффициент вариации $C_1$	Коэффициент состояния древесины
			По опыту эксплуатации	Расчетное		
Разъезд 787-Жослык	475	10	1,3	1,2	0,07	1,32

На основании экспериментов были сделаны следующие выводы:

1. Наиболее благоприятные условия для перекрытия комбинированной изоляции «фарфор - дерево» возникают во время высыхания полупроводящего слоя загрязнения на изоляторе и расположения фронта очагов возгорания по длине траверсы.

2. Наиболее благоприятные условия возгорания траверсы наблюдается в первые моменты увлажнения комбинированного узла атмосферными осадками.

3. Плотность слоя загрязнений на поверхности изолятора и его химический состав определяют время подсушки, следовательно, интенсивность изменения тока утечки и время его воздействия на древесину.

4. Процесс перекрытия комбинированной изоляции «фарфор - дерево» начинается с возникновения первичных частичных дуг, далее появлением поперечных и продольных дуг и завершается подсушкой поверхности изолятора со смещением во времени развития термического разложения древесины.

5. Зная химический состав загрязнения изоляции, количественный состав пылевого отложения в условиях эксплуатации и его проводимость, можно подобрать для данного региона рецептуру покрытия поверхности изоляторов способную при увлажнении вступать во взаимодействие с загрязнением и самоочищаться.

6. Предложенная математическая модель ожидаемого числа возгораний деревянных элементов ВЛ 10 кВ системы продольного электроснабжения позволяет определить удельное число возгорания деревянных элементов ВЛ 10 кВ, которое составляет 1,2 на 100 км в год, по опыту эксплуатации - 1,3.

7. В целях проведения эффективных профилактических мероприятий от био- и огнеразрушений деревянных элементов несущих и опорно-поддерживающих конструкций ВЛ продольного электроснабжения, целесообразно ввести в структуру служб электроснабжения дорог квалифицированный персонал, отвечающий только за мониторинг состояния элементов ВЛ и их химическую защиту.

## **6. МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОПИТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

### **6.1. Модель равновесной гигроскопичности пропитанной древесины от защитных и эксплуатационных факторов**

Увлажнение и высыхание древесины сопровождается разбуханием и усушкой стенок трахеид. При этом наиболее интенсивно значительные деформации развиваются на поверхности, что стимулирует деструкцию древесины.

Деструкция поверхности древесины в процессе эксплуатации происходит в основном в результате температурно-влажностных атмосферных изменений, осадков, инсоляции и биоповреждений. При эксплуатации древесина подвергается гидролитическому разрушению под действием влаги, ускоряющемуся в присутствии углекислоты из воздуха, а также из-за пыли или других загрязнителей, которые адсорбируются на ее поверхности. В связи с тем, что электроизоляционные свойства древесины зависят не только от выше перечисленных факторов, но и от химического состава защитного препарата и качества самой её поверхности, были проведены исследования направленные на то, чтобы определить влагопоглощение древесины изоляционных конструкций ВЛ и КС пропитанной защитными химическими препаратами в температурно-влажностных режимах эксплуатации, которые позволят определить препарат придающий древесине наряду с защитными лучшими электроизоляционные свойства в регионах с повышенным загрязнением атмосферы. Изоляционные конструкции ВЛ и КС эксплуатируются в широком диапазоне изменения температуры и влажности. Пропиточные защитные препараты имеют различные концентрации рабочего раствора. Древесина поддерживающих конструкций КС, несущих и опорно-поддерживающих конструкций ВЛ при одном и том же способе пропитки химическими препаратами поглощает различное количество сухой соли. Изменение температуры, влажности и концентрации рабочего защитного раствора, а также поглощенное количество сухой соли приводит к изменению гигроскопичности деревянной изоляционной конструкции ВЛ и КС. Отмеченные факторы во многом определяют характер влагопоглощения пропитанной древесины комбинированной изоляции «фарфор-дерево» [179-180].

По полученным экспериментальным данным был исследован параметр, в дальнейшем именуемый функцией отклика и обозначаемый буквой  $G$ , характеризующий гигроскопичность пропитанной древесины изоляционных конструкций ВЛ и КС.

Для определения коэффициентов регрессии и дисперсий оценок коэффициентов регрессии применялись формулы методик множественной криволинейной регрессии [181]. Окончательный закон

распределения сформированных выборок был определен только после проверки 12 законов распределения на ЭВМ. Статистическая обработка (оценка средних уровней отмеченных параметров гигроскопичности пропитанной древесины, величин дисперсий относительно средних и проверка соответствия принятых вероятностных законов распределения) экспериментальных значений была проведена при помощи программ для однофакторного дисперсионного анализа, функций экспоненциальной множественной регрессии пакета «EXCEL».

Полученный экспериментальный материал позволил получить регрессионную модель гигроскопичности пропитанной древесины от защитных и эксплуатационных факторов.

После обработки полученной многомерной выборки (табл. 21) для получения эмпирической формулы регрессии был принят следующий вид регрессионной модели

$$G = b_0 \times b_1^K \times b_2^C \times b_3^T \times b_4^B, \quad (94)$$

где  $b_0$  - коэффициент, характеризующий среднее значение функции отклика при нулевых значениях всех факторов;  $K, C, T, B$  - значения факторов.  $K$  - концентрация рабочего раствора защитного химического препарата (%);  $C$  - количество сухой соли поглощенное древесиной ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $T$  - температура окружающего воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ );  $B$  - относительная влажность окружающего воздуха (%);  $b_1, b_2, b_3, b_4$  - коэффициенты регрессии, характеризующие величину влияния соответствующего фактора на исследуемый процесс.

Результаты регрессионного и дисперсионного анализа полученной стохастической модели представлены в табл. 21, 22. Стохастическая модель равновесной гигроскопичности пропитанной древесины от защитных и эксплуатационных факторов имеет вид

$$G = 4,683289 \cdot 17,49356^K \cdot 0,987127^C \cdot 1,001367^T \cdot 1,0680042^B. \quad (95)$$

Результаты исследований показывают, что экспоненциальная кривая наиболее точно описывает динамику влагопоглощения пропитанной древесины в температурно-влажностных режимах эксплуатации. Проведя регрессионный анализ, вычислили для каждой точки квадрат разности между прогнозируемым значением  $G$  и фактическим значением отклика и определили остаточную сумму квадратов. Затем подсчитали сумму квадратов разностей между фактическими значениями и средним значением отклика  $G$ , т. е. общую сумму квадратов (регрессионная сумма квадратов + остаточная сумма квадратов). Остаточная сумма квадратов по сравнению с общей суммой квадратов, значительно меньше, поэтому величина коэффициента детерминированности  $R^2$  имеет большое значение, которое показывает, насколько хорошо уравнение, полученное с по-

мощью регрессионного анализа, объясняет взаимосвязи между переменными.

Для уравнения регрессии коэффициент детерминации табл. 21  $R^2=0,84$ , что больше 0,75, следовательно, уравнение регрессии работоспособно и указывает на сильную зависимость между независимыми переменными и гигроскопичностью.

Таблица 21

**Статистические характеристики регрессионной модели**

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,9164
R-квадрат	0,8398
Стандартная ошибка	0,02416
Наблюдения	40

Таблица 22

**Статистические характеристики дисперсионного анализа**

	Количество степеней свободы	Сумма квадратов отклонений	Дисперсия	Критерий Фишера F	Табличное значение критерия Фишера F $\alpha=0,05$
Регрессия	4	Q1=0,1071	$S1^2= 0,02678$	45,885	2,69
Остаток	35	Q2=0,0204	$S2^2= 0,00058$		
Итого	40	Q=0,1275			
Коэффициенты	Значения коэффициентов	Стандартная ошибка	t - статистика	Табличное значение t - статистики $\alpha=0,05$	
$b_0$	4,6833	0,05408	86,5945	2,13	
$b_1$	17,4936	0,5333	32,8042	2,13	
$b_2$	0,9872	0,0029	335,1078	2,13	
$b_3$	1,0014	0,00038	2621,3796	2,13	
$b_4$	1,0680	0,0142	75,2333	2,13	

где: Q - сумма квадратов отклонений выборки относительно общего среднего арифметического; Q1 - сумма квадратов отклонений групповых средних относительно общей средней; Q2 - сумма квадратов отклонений значений выборки относительно групповых средних;  $S1^2$  - факторная дисперсия;  $S2^2$  - остаточная дисперсия

Используем F-статистику, чтобы определить, является ли этот результат (с таким высоким значение  $R^2$ ) случайным. Предположим, что на самом деле нет взаимосвязи между переменными, а просто

были выбраны редкие 40 случаев определенной гигроскопичности для деревянных изоляционных конструкций защищенных антипиренами, для которых статистический анализ вывел сильную взаимосвязь. Величину  $\alpha$  используем для обозначения вероятности ошибочного вывода о том, что имеется сильная взаимосвязь. Если  $F$ -наблюдаемое больше, чем  $F$ -критическое, то взаимосвязь между переменными имеется.  $F$ -критическое получим из таблицы  $F$ -критических значений [182]. Для того чтобы найти это значение, используем односторонний тест, положим величину  $\alpha=0,05$ , а для числа степеней свободы, положим  $v_1=k=4$  и  $v_2=n-(k+1)=40-(4+1)=35$ , где  $k$  - это число переменных, а  $n$  - число точек данных. Из справочной таблицы  $F$ -критическое равно 2,69. Так как  $F$ -наблюдаемое равно 45,885 (табл. 22) заметно больше чем  $F$ -критическое значение 2,69. Следовательно, полученное регрессионное уравнение полезно для предсказания влагопоглощения деревянных изоляционных конструкций.

Другой гипотетический эксперимент позволил определить, полезен ли каждый коэффициент фактора для оценки влагопоглощения древесины. Для проверки статистической значимости определяли для каждого коэффициента наблюдаемое  $t$ -значение. Нашли  $t$ -критическое с 4 степенями свободы и  $\alpha=0,05$  с учетом оценки стандартной ошибки для каждого коэффициента [182]. Поскольку абсолютная величина наблюдаемого  $t$ , для всех коэффициентов факторов больше чем  $t$ -критическое по каждому коэффициенту, то, следовательно, все переменные статистически значимы. В табл. 22 приводятся наблюдаемые  $t$ -значения для каждой из независимых переменных.

Полученное уравнение регрессии позволяет определить показатель влагопоглощения комбинированной изоляции «фарфор-дерево» ВЛ и КС от эксплуатационных и защитных факторов.

На рис. 70 показаны графики подбора независимых переменных: а) - температуры; б) - влажности; в) - количества поглощенной сухой соли; г) - концентрации рабочего раствора. Приведенные (рис. 70) графики свидетельствуют о сильной зависимости гигроскопичности деревянных изоляционных конструкций, пропитанных антипиренами (ДМ-11, БС, ФБС-255 и СА), от эксплуатационных и защитных факторов.

На рис. 71-74 представлены зависимости отклика  $\Gamma$  от выбранных факторов.

Анализ зависимости представленной на рис. 71 показывает, что на величину гигроскопичности сильное влияние оказывает относительная влажность, меньшее температура окружающей среды. Из зависимости представленной на рис. 72, следует, что влагопоглощение в большей степени зависит от концентрации рабочего раствора, чем от количества поглощенной сухой соли антипирена.

Произведя анализ, приведенных на рис. 73 и 74, зависимостей гигроскопичности от защитных и эксплуатационных факторов, можно сделать вывод, что на величину гигроскопичности, пропитанных деревянных изоляционных конструкций, большее влияние оказывает количество поглощенной сухой соли антипирена, чем температура и влажность.

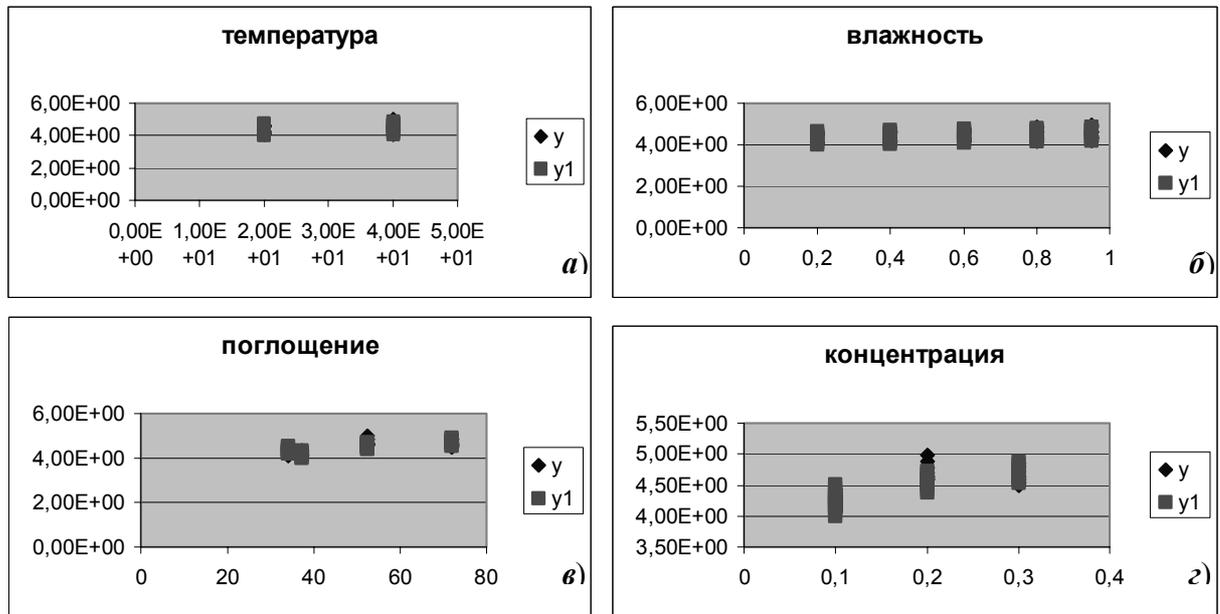


Рис. 70. Графики подбора переменных. Экспериментальные (y) и предсказанные (y1) данные отклика

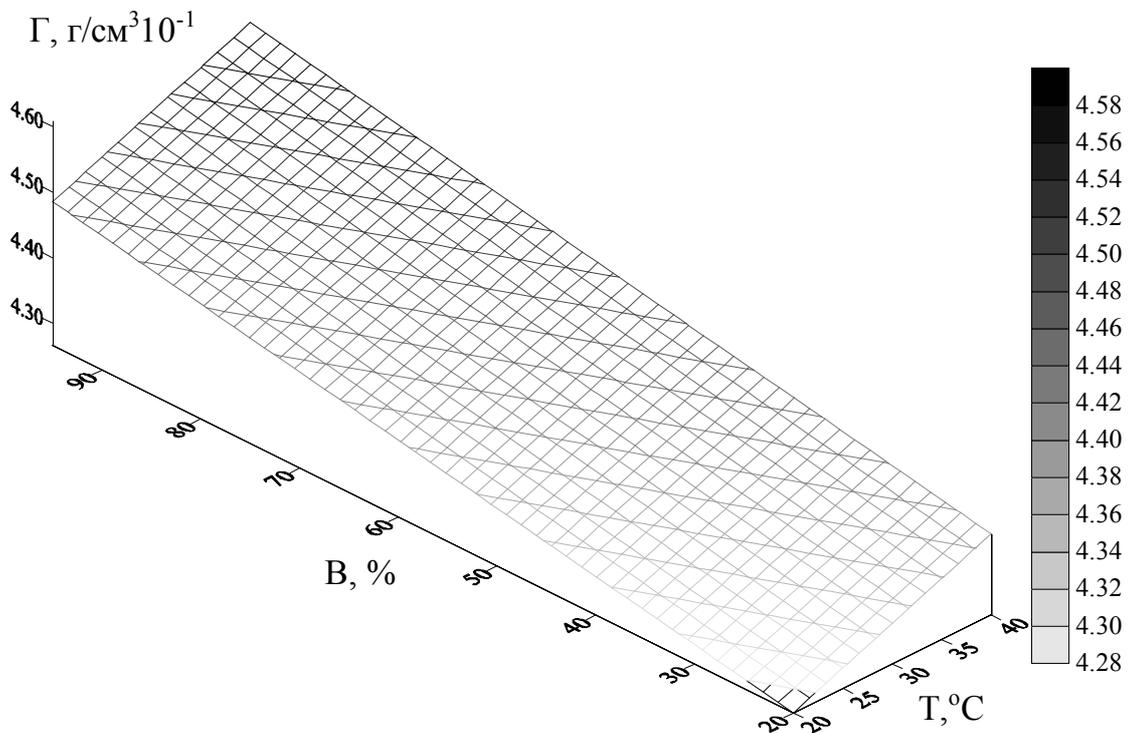
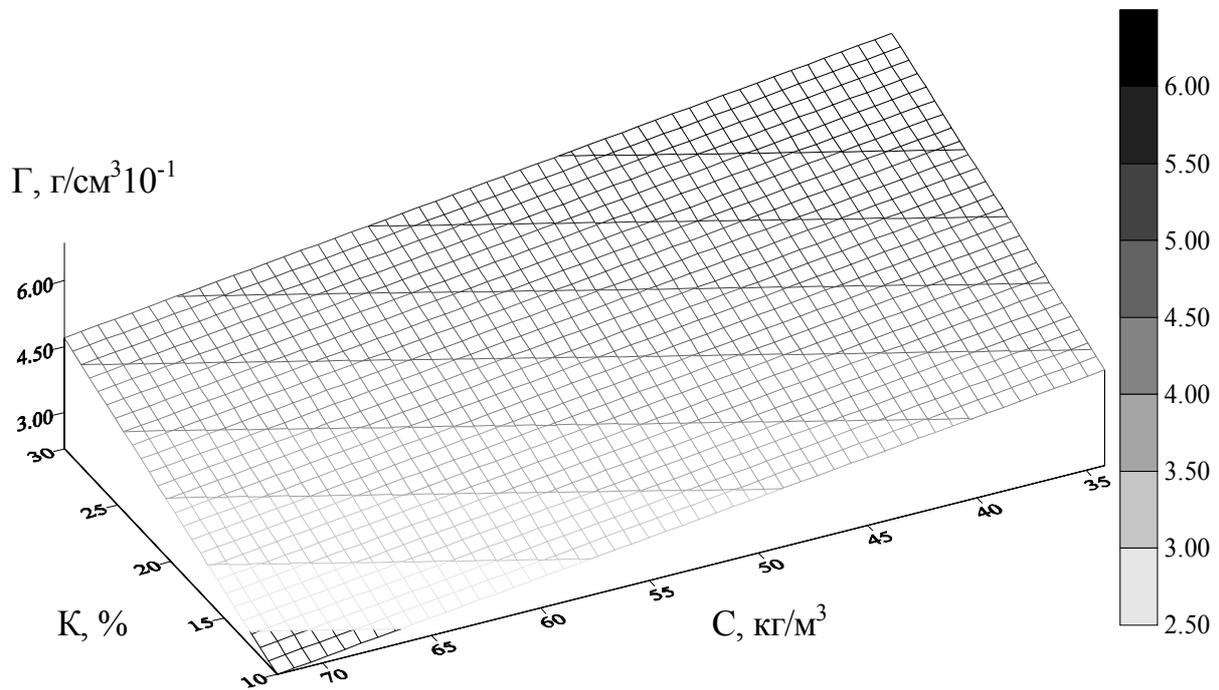
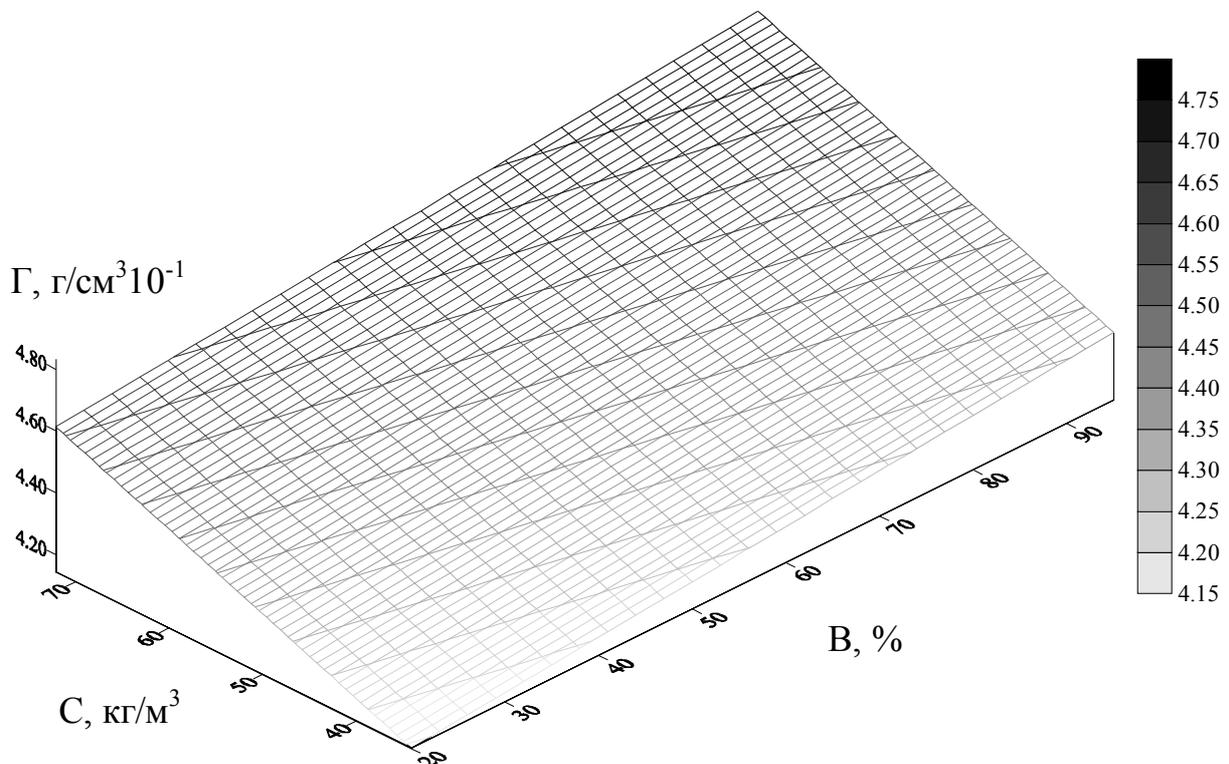


Рис. 71. Влияние факторов Т и В на гигроскопичность деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций

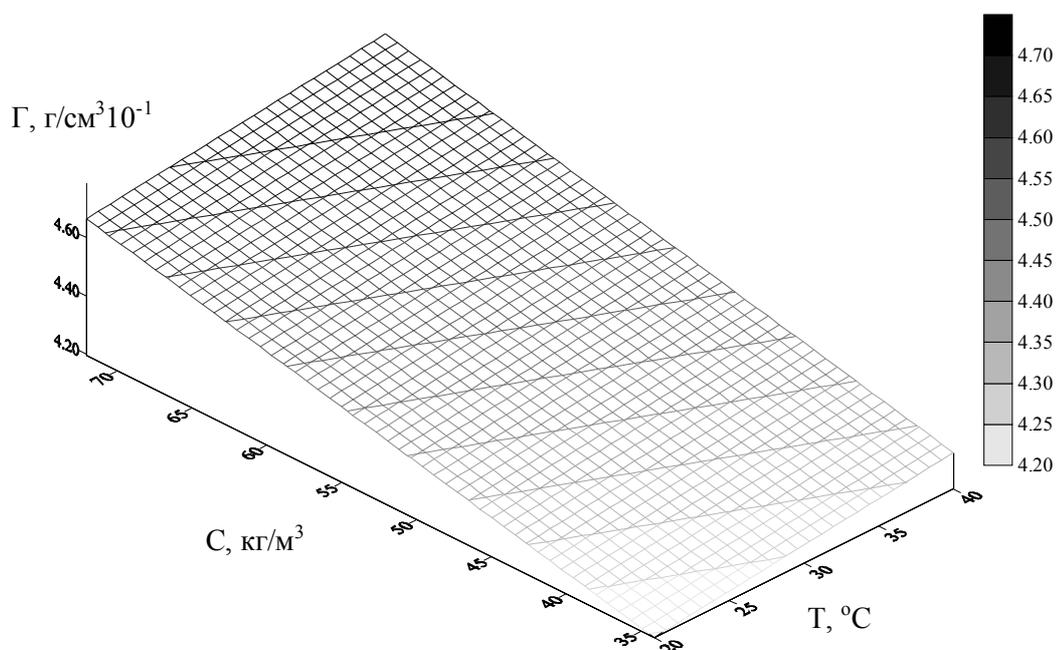
Как следует из графиков (рис. 71-74) на гигроскопичность  $\Gamma$ , наибольшее влияние оказывает относительная влажность окружающей среды  $B$ , концентрация рабочего раствора  $K$ , несколько меньшее количество поглощенной соли  $C$  и температура  $T$ .



**Рис. 72. Влияние факторов  $C$  и  $K$  на гигроскопичность деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций**



**Рис. 73. Влияние факторов  $B$  и  $C$  на гигроскопичность деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций**



**Рис. 74. Влияние факторов Т и С на гигроскопичность деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций**

Стохастическая модель может быть использована затем для целей предсказания значений отклика от внешних воздействий и свойств химического препарата, которые не только защищают древесину конструкций от деструктивных изменений, но и придают защищаемой древесине наилучшие электроизоляционные свойства в районах с загрязненной атмосферой и с тяжелыми климатическими условиями.

## **6.2. Модель электрического сопротивления пропитанной древесины изоляционных конструкций ВЛ и КС**

Способность древесины проводить электрический ток характеризует её электрическое сопротивление. Оно имеет значение при изготовлении штанг приводов разъединителей и масляных выключателей, рукояток рубильников и электроинструментов, опорных и крепежных деталей трансформаторов высокого и низкого напряжения, пазовых клиньев электрических машин. Свойства древесины играют большую роль при решении вопроса грозоупорности линий 35-110 кВ деревянных опор и их возгораемости от токов утечки и т.п.

Влияние режимов работы на электрофизические свойства древесины на сегодняшний день теоретически изучены слабо. Исследования показали, что изоляционные свойства деревянных конструкций сильно зависят от состояния поверхности древесины (влажности и неравномерности ее распределения, наличия загнивания и трещин, режима увлажнения поверхности и т. д.). Следствием этой зависимости является значительный разброс результатов измерений, выполненных на различных образцах.

Для определения электрического сопротивления древесины изоляционных конструкций ВЛ и КС, пропитанных различными антипиренами в температурно-влажностных режимах эксплуатации, был проведен комплекс экспериментальных исследований.

Полученный экспериментальный материал позволил получить регрессионную модель логарифма электрического сопротивления пропитанной древесины от защитных и эксплуатационных факторов.

В связи с тем, что на электрофизические свойства антипирированной древесины изоляционных конструкций, влияет большое количество физических факторов, был учтен опыт Д.А Беленкова [179], который позволил определить из защитных факторов наиболее значимые.

По полученным экспериментальным данным был исследован параметр, в дальнейшем именуемый функцией отклика и обозначаемый  $Y$ , ( $Y = \ln \rho_V$ ), характеризующий логарифм удельного объемного сопротивления пропитанной огнезащитными препаратами (ДМ-11, БС, ФБС-255 и СА) древесины изоляционных конструкций ВЛ и КС (табл. 23).

После обработки полученной многомерной выборки для получения эмпирической формулы регрессии был принят следующий вид регрессионной модели

$$Y = b_0 \times b_1^K \times b_2^C \times b_3^T \times b_4^B, \quad (96)$$

где  $b_0$  - коэффициент, характеризующий среднее значение функции отклика при нулевых значениях всех факторов;  $K, C, T, B$  - значения факторов.  $K$  - концентрация рабочего раствора защитного химического препарата (%);  $C$  - количество сухой соли поглощенное древесиной ( $\text{кг/м}^3$ );  $T$  - температура окружающего воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ );  $B$  - относительная влажность окружающего воздуха (%);  $b_1, b_2, b_3, b_4$  - коэффициенты регрессии, характеризующие величину влияния соответствующего фактора на исследуемый процесс.

Результаты регрессионного и дисперсионного анализа полученной стохастической модели представлены в таблицах 23, 24.

Стохастическая модель логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины от защитных и эксплуатационных факторов имеет вид

$$Y = 66,432 \cdot 31,769^K \cdot 0,979^C \cdot 0,993^T \cdot 0,617^B \quad (97)$$

Результаты исследований показывают, что экспоненциальная кривая наиболее точно описывает динамику логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины в температурно-влажностных режимах эксплуатации.

Для уравнения регрессии коэффициент детерминации табл. 23  $R^2 = 0,93$ , что больше 0,75, следовательно, уравнение регрессии работоспособно и указывает на сильную зависимость между незави-

симыми переменными и сопротивлением, объясняет взаимосвязи между переменными.

Так как F-наблюдаемое равно 384,78, что заметно больше чем F-критическое значение 2,45. Следовательно, полученное регрессионное уравнение полезно для предсказания логарифма сопротивления (объемного) деревянных изоляционных конструкций ВЛ и КС.

Таблица 23

**Статистические характеристики регрессионной модели**

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,963
R-квадрат	0,927
Стандартная ошибка	0,055
Наблюдения	127

Таблица 24

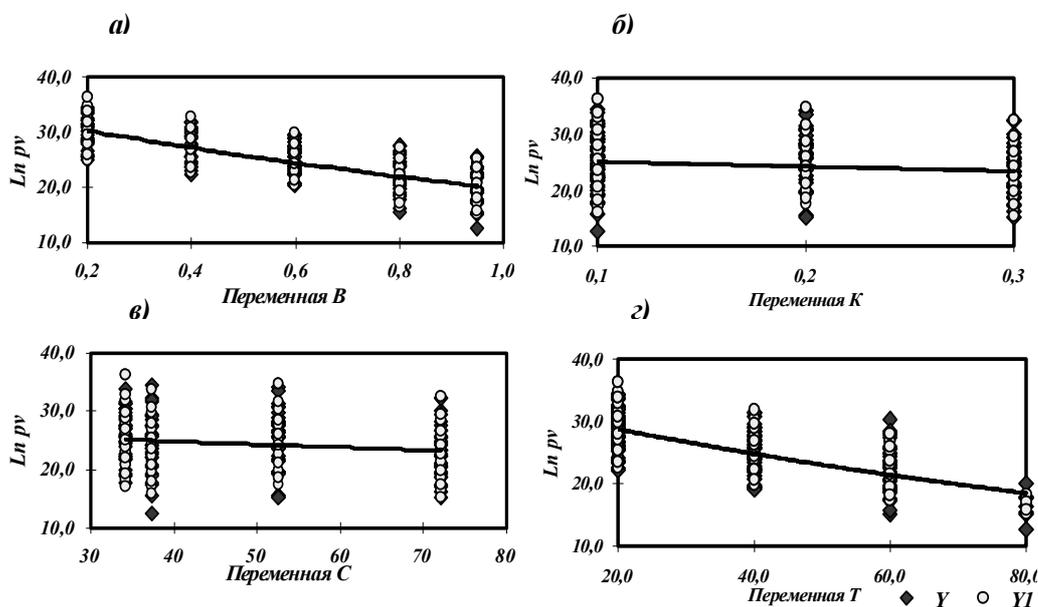
**Статистические характеристики дисперсионного анализа**

	Количество степеней свободы	Сумма квадратов отклонений	Дисперсия	Критерий Фишера F	Табличное значение критерия Фишера F $\alpha=0,05$
Регрессия	4	Q1=4,664	$S1^2=1,166$	384,776	2,45
Остаток	122	Q2=0,370	$S2^2=0,00303$		
Итого	127	Q=5,0342			
Коэффициенты	Значения коэффициентов	Стандартная ошибка	t - статистика	Табличное значение t - статистики $\alpha=0,05$	
$b_0$	66,432	0,0681	97,534	2,13	
$b_1$	31,769	0,681	4,664	2,13	
$b_2$	0,979	0,00376	260,218	2,13	
$b_3$	0,993	0,000269	3698,604	2,13	
$b_4$	0,617	0,0182	33,791	2,13	

где: Q - сумма квадратов отклонений выборки относительно общего среднего арифметического; Q1 - сумма квадратов отклонений групповых средних относительно общей средней; Q2 - сумма квадратов отклонений значений выборки относительно групповых средних;  $S1^2$  - факторная дисперсия;  $S2^2$  - остаточная дисперсия

Поскольку абсолютная величина наблюдаемого  $t$ , для всех коэффициентов факторов больше чем  $t$ -критическое по каждому коэффициенту, то, следовательно, все переменные статистически значимы.

На рис. 75 показаны графики подбора независимых переменных: а) - влажности; б) - концентрации рабочего раствора; в) - количества поглощенной сухой соли; г) - температуры. На рис. 76-79 представлены зависимости логарифма сопротивления (объемного) деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций ВЛ и КС от климатических и защитных факторов.

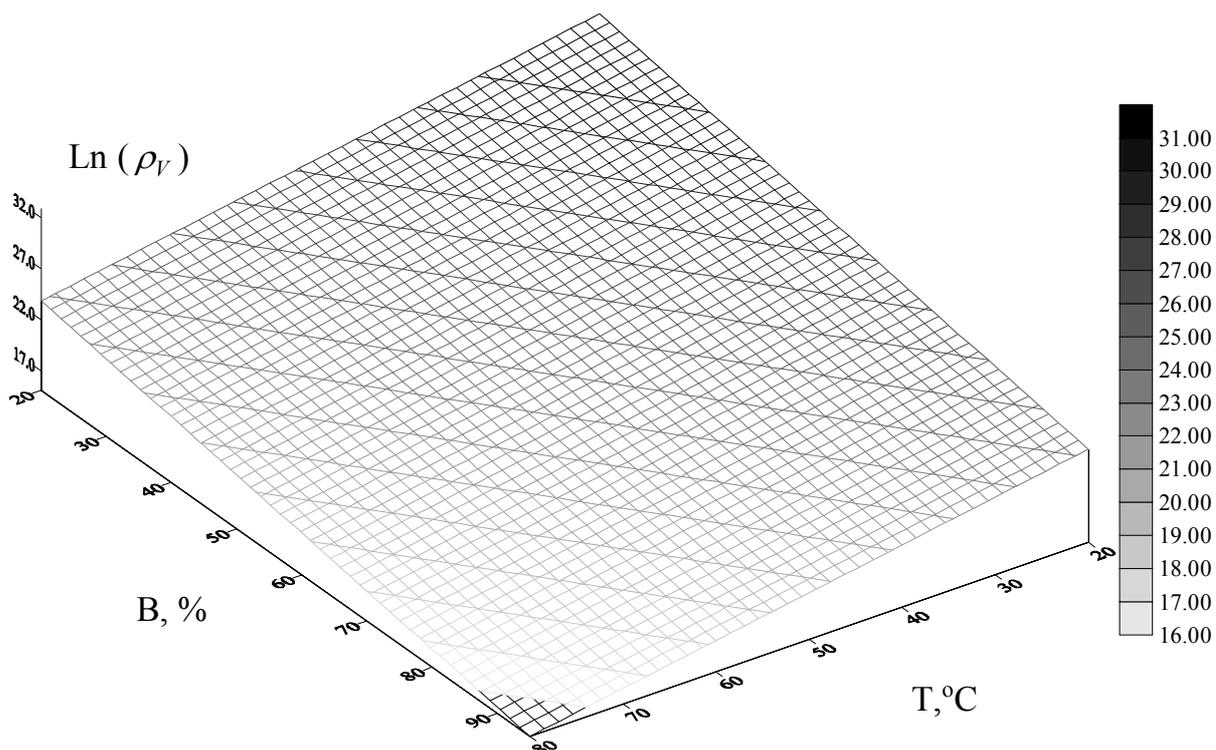


**Рис. 75. Графики подбора переменных. Экспериментальные (Y) и предсказанные (Y1) данные отклика. Линии трендов для Y и Y1**

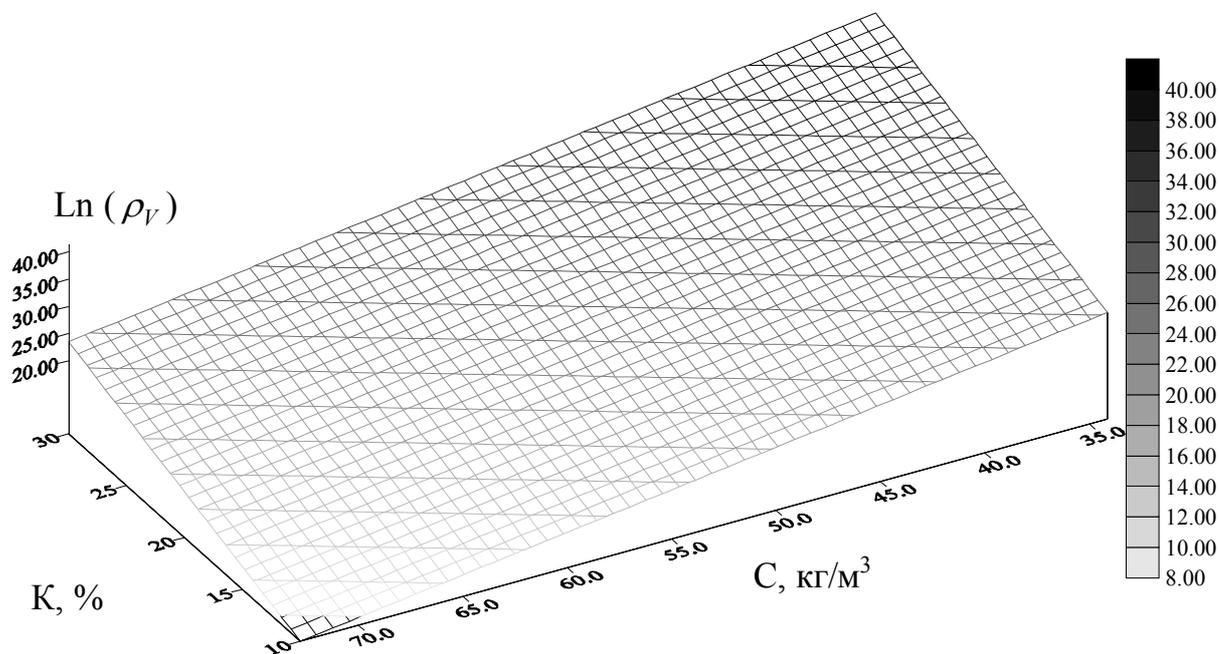
Приведенные на рис. 75 графики свидетельствуют о сильной зависимости логарифма сопротивления (объемного) деревянных изоляционных конструкций, пропитанных антипиренами (ДМ-11, БС, ФБС-255 и СА), от эксплуатационных и защитных факторов. Полученное уравнение регрессии позволяет определить показатель электроизоляционных свойств комбинированной изоляции «фарфор-дерево» ВЛ и КС от влияющих факторов.

Анализ зависимости представленной на рис. 76 показывает, что на величину логарифма объемного сопротивления сильное влияние оказывает относительная влажность, меньшее температура окружающей среды. Из зависимости представленной на рис. 77, следует, что логарифм удельного объемного сопротивления в большей степени зависит от количества поглощенной сухой соли антипирена, чем от концентрации рабочего раствора.

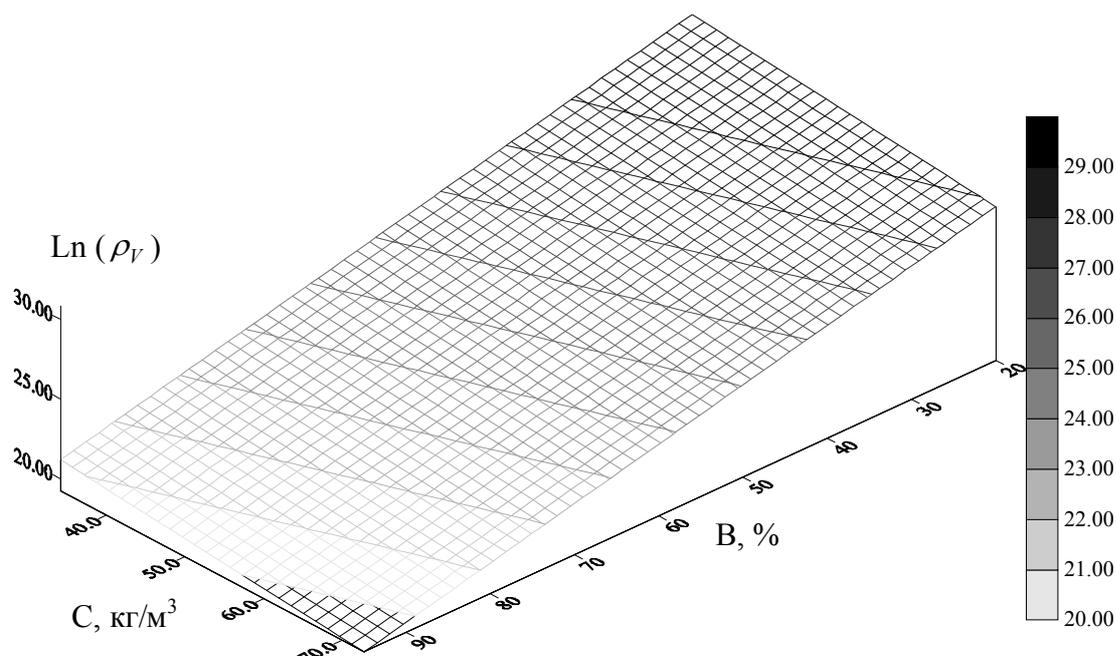
Можно сделать вывод проанализировав, приведенные на рис. 78 и 79, зависимости логарифма сопротивления (объемного) от защитных и эксплуатационных факторов, что на величину логарифма удельного объемного сопротивления, пропитанных деревянных изоляционных конструкций, большее влияние оказывает количество поглощенной сухой соли антипирена, чем влажность и температура.



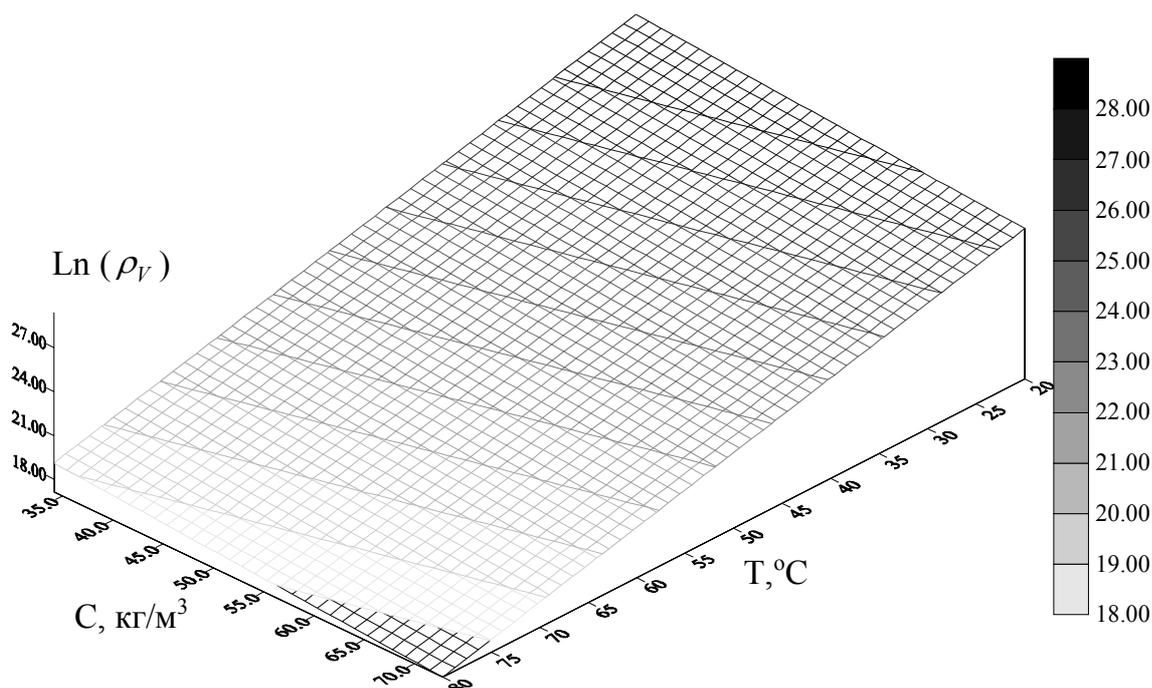
**Рис. 76. Влияние факторов В и Т на логарифм сопротивления (объемного) деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций**



**Рис. 77. Влияние факторов К и С на логарифм сопротивления (объемного) деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций**



**Рис. 78.** Влияние факторов  $B$  и  $C$  на логарифм сопротивления (объемного) деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций



**Рис. 79.** Влияние факторов  $T$  и  $C$  на логарифм сопротивления (объемного) деревянных пропитанных антипиренами изоляционных конструкций

Как следует из графиков (рис. 76 - 79) на логарифм объемного сопротивления  $Y$ , наибольшее влияние оказывает количество поглощенной соли  $C$ , относительная влажность окружающей среды  $B$ , несколько меньшее концентрация рабочего раствора  $K$  и температура  $T$ . Полученная модель может быть использована затем для целей предсказания значений отклика от внешних воздействий и свойств химического препарата.

### **6.3. Оптимизация выбора защитных химических препаратов деревянных изоляционных конструкций ВЛ и КС**

От рационального выбора химического препарата применяемого для защитной обработки деревянных изолирующих и опорно-поддерживающих конструкций, эксплуатируемых в достаточно жестких условиях, во многом зависит надежность работы всей системы электроснабжения.

Для этой цели была разработана программа на основе дискретного анализа электрических, экологических, технологических, эксплуатационных и экономических характеристик.

Были рассмотрены широко используемые отечественной промышленностью каменноугольное масло, нафтенат меди и водорастворимые препараты ХМ-11 (смесь солей хрома и меди) и фторид натрия.

Системный анализ качественных и количественных оценок различных показателей защитных препаратов для указанного применения производили по наиболее приемлемому методу экспертных оценок, основанному на построении иерархической структуры с учетом приоритета рассматриваемых факторов. Метод анализа иерархий (МАИ) заключается в разделении обобщенной задачи на более простые составляющие части и дальнейшей обработке последовательности суждений независимых экспертов по парным сравнениям компонентов [49, 186]. В результате этого выявляется относительная степень (интенсивность) взаимодействия в построенной иерархии разнородных показателей химических препаратов, которые затем представляются в численном виде. МАИ [183-185] включает процедуры синтеза множественных суждений, получения приоритетов критериев и нахождения альтернативных решений. Полученные таким образом значения являются оценками в шкале отношений.

Решение проблемы заключается в поэтапном установлении приоритетов. На первом этапе выявляли наиболее важные показатели химических препаратов, на втором - наилучший способ проверки наблюдений, испытания и их оценки; следующим этапом являлась проверка способа применения решения и оценка его качества.

Процесс поэтапных проверок и переосмыслений осуществляли до тех пор, пока не появилась уверенность, что учтены все важные характеристики рассматриваемых защитных препаратов, необходимые для оптимального выбора с учетом конкретных условий их применения.

Аналитический процесс проводили над последовательностью иерархий. При этом результаты, полученные в одной из них, используются в качестве исходных данных при изучении следующей. Рассмотренный метод позволяет систематизировать процесс решения многоступенчатой задачи оптимизации.

Первым этапом МАИ является построение структуры проблемы в виде иерархии или сети. При этом проводим двухуровневую про-

цедуру обзора и оценки событий по одной из моделей метода Дельфи [183].

На первом уровне оценки эксперты из числа опытных производственных технологов заполнили анкеты, оценивая химические препараты по каждому из критериев. Промежуточные уровни иерархий обычно представляют собой критерии, с помощью которых оцениваются более низкие уровни. При анализе консервантов первоначально рассматривали 16 их показателей. После качественного анализа 16 показателей, традиционно используемых для характеристики средств защиты древесины, у некоторых критериев изменили формулировки и сократили их количество. При окончательном решении рассматривали 11 наиболее значимых показателей консервантов: К1 - электроизоляционные свойства; К2 – пожароопасность по токам утечки при переменных температурно-влажностных условиях эксплуатации; К3 - защитные свойства; К4 - экологическая опасность; К5 - токсичность; К6 - сложность технологического процесса защитной обработки изделий из древесины; К7 - коррозионная активность по отношению к черным металлам; К8 - комфортность обслуживания пропитанных конструкций; К9 - эстетический вид пропитанных изделий; К10 - удельные затраты на 1 куб. пропитанных конструкций, К11 - пылеудержание.

Самый низкий уровень представляет собой возможные варианты решения (альтернативы) рассматриваемой проблемы. Построенная доминантная иерархия является полной, поскольку каждый элемент заданного уровня функционирует, как критерий для всех элементов нижестоящего уровня, и может служить для оценки элементов более низкого уровня.

При оптимизации выбора консервантов для защитной обработки деревянных изолирующих конструкций ВЛ и КС учитывали мнения группы независимых экспертов. Это вызвало необходимость усреднения их суждений с использованием понятия усреднённой оценки. Результаты проведенного усреднения показаны в табл. 25.

Таблица 25

**Усредненные значения попарного сравнения критериев оценки консервантов**

	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	К9	К10	К11
К1	1	5	1	0,5	0,5	7	5	5	7	1	3
К2	0,2	1	0,5	0,25	0,5	0,5	3	2	7	0,5	1
К3	1	2	1	2	1	3	6	5	7	5	4
К4	2	4	0,5	1	1	3	5	5	8	6	5
К5	2	2	1	1	1	5	7	5	8	4	6
К6	0,14	2	0,33	0,33	0,2	1	5	2	7	3	4
К7	0,2	0,33	0,17	0,2	0,14	0,2	1	0,5	5	0,5	1
К8	0,20	0,50	0,20	0,20	0,20	0,50	2	1	5	0,50	1
К9	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,20	0,20	1	0,25	0,50
К10	1	2	0,20	0,17	0,25	0,33	2	2	4	1	4
К11	0,33	1	0,25	0,20	0,17	0,25	1	1	2	0,25	1

Ранжирование элементов, анализируемых с использованием матрицы парных сравнений  $[A]$ , осуществляется на основании главных собственных векторов, получаемых в результате обработки матриц. Вычисление главного собственного вектора  $W$  положительной квадратной матрицы  $[A]$  проводится на основании равенства

$$AW = \lambda_{max}W, \quad (98)$$

где  $\lambda_{max}$  - максимальное собственное значение матрицы  $[A]$ .

Для положительной квадратной матрицы  $[A]$  правый собственный вектор  $W$ , соответствующий максимальному собственному значению  $\lambda_{max}$ , с точностью до постоянного множителя  $C$  можно вычислить по формуле

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{[A]^k e}{e^T [A]^k e} = CW, \quad (99)$$

где  $e = \{1, 1, 1, \dots, 1\}^T$  - единичный вектор;  $k = 1, 2, 3, \dots$  - показатель степени;  $C$  - константа;  $T$  - знак транспонирования.

Вычисление собственного вектора  $W$  по выражению (99) производится до достижения заданной точности:

$$e^T |W^{(l)} - W^{(l+1)}| \leq \xi, \quad (100)$$

где  $l$  - номер итерации, такой, что  $l = 1$  соответствует  $k = 1$ ;  $l = 2$ ,  $k = 2$  и т.д.;  $\xi$  - допустимая погрешность.

С достаточной для практики точностью можно принять  $\xi = 0,01$  независимо от порядка матрицы. Максимальное собственное значение вычисляется по формуле:

$$\lambda_{max} = e^T [A]W \quad (101)$$

Результаты ранжирования критериев, полученные после обработки анкет пяти экспертов, приведены в табл. 26.

В практических задачах количественная (кардинальная) и транзитивная (порядковая) однородность (согласованность), как правило, нарушается из-за того, что человеческие ощущения невозможно выразить точной формулой. Для улучшения однородности в числовых суждениях, какая бы величина  $a_{ij}$  ни была взята для сравнения  $i$ -го элемента с  $j$ -м,  $a_{ji}$  приписывается значение обратной величины, т.е.  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ . Отсюда следует, что если один элемент в  $a$  раз предпочтительнее другого, то последний в  $1/a$  раз предпочтительнее первого.

При нарушении однородности ранг матрицы отличен от единицы и она будет иметь несколько собственных значений. Однако при небольших отклонениях суждений от однородности одно из собственных значений будет существенно больше остальных и приблизительно равно порядку матрицы.

**Результаты ранжирования критериев оценки консервантов по величинам весовых коэффициентов**

Критерий	Весовой коэффиц.	«Место» критерия	Критерий	Весовой коэффиц.	«Место» критерия
K1	0,156868	4	K6	0,080490	5
K2	0,054342	7	K7	0,027360	10
K3	0,172251	3	K8	0,035127	8
K4	0,178892	2	K9	0,013951	11
K5	0,186884	1	K10	0,063183	6
K11	0,030652	9			

Таким образом, для оценки однородности суждений эксперта необходимо использовать отклонение величины максимального собственного значения  $\lambda_{max}$  от порядка матрицы  $n$ .

Однородность суждений оценивается индексом однородности ( $I_o$ ) или отношением однородности ( $O_o$ ) в соответствии со следующими выражениями:

$$I_o = (\lambda_{max} - n) / (n - 1); \quad O_o = I_o / M(I_o),$$

где  $M(I_o)$  - среднее значение (математическое ожидание) индекса однородности случайным образом составленной матрицы парных сравнений  $[A]$ , которое основано на экспериментальных данных [184].

В качестве допустимого используется значение  $O_o \leq 0,10$ . Если для матрицы парных сравнений отношение однородности  $O_o > 0,10$ , то это свидетельствует о существенном нарушении логичности суждений, допущенном экспертом при заполнении матрицы. Для улучшения однородности в этой ситуации эксперту следует пересмотреть данные, использованные для построения матрицы.

Объединение «весов» критериев и сравнения защитных препаратов по каждому из критериев свели в одну модель. Это позволило присвоить средневзвешенную оценку каждому препарату. По результатам расчета рассматриваемые консерванты были размещены в следующем порядке по приоритету рассчитанных количественных показателей обобщенных оценок: 1 - КМ (оценка - 0,438196), 2 - ХМ-11 (0,2828699), 3 - НМ (0,1604619), 4 - ФН (0,118472).

Разработанная методика оптимального выбора защитного препарата деревянных элементов изолирующих конструкций контактной сети и воздушных линий на основе экспертных оценок опытных производственных технологов по 11 разнородным показателям, которые при последующем анализе по методу иерархий были выражены в численном виде, позволяет исключить влияние субъективных факторов на принятие окончательного решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии приводится обширный экспериментальный и теоретический материал, посвященный электроизоляционным свойствам натуральной и пропитанной древесины сосны, широко используемой в качестве изоляционных конструкций ВЛ и КС. Отсутствие теории расчета электрических параметров древесины, а также малая изученность влияния взаимодействия связанной влаги с древесиной на характер изменения электроизоляционных свойств не позволяли предсказать взаимодействие древесины деревянных элементов ВЛ и КС с температурой и влажностью окружающей среды, с защитным химическим препаратом, электромагнитным полем и др.

В данной работе получены аналитические зависимости электрического сопротивления натуральной и пропитанной химическими защитными препаратами древесины от температуры и относительной влажности воздуха, вида и концентрации рабочего пропиточного раствора для равновесных условий её эксплуатации.

На основании многолетних исследований была получена математическая модель ожидаемого числа возгораний деревянных элементов ВЛ 10 кВ системы продольного электроснабжения.

Предложен рациональный метод выбора химического препарата применяемого для защитной обработки деревянных изолирующих и опорно-поддерживающих конструкций.

Разработаны стохастические модели разновесной гигроскопичности и электрического сопротивления древесины, которые могут быть использованы затем для целей предсказания и прогнозирования электрофизических свойств и возможности разрушения от токов утечки деревянных изоляционных конструкций ВЛ и КС в различных почвенно-климатических регионах России и СНГ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новикова Н.В., Овсеенко В.В. Применение деревянных опор для воздушных линий напряжением 35 кВ и выше во Франции и США // Энергохозяйство за рубежом. - 1967. - №3.
2. Поберезин Е. А. Клееная древесина для опор линий электропередачи // Электрические станции. - 1970. - № 1.
3. Гальперн М. Л. Деревянные опоры линий электропередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1972.
4. Григорьев Ю. Е. Деревянные клееные траверсы для металлических опор // Энергетическое хозяйство за рубежом. - 1968. - № 1.
5. Бургсдорф В. В., Овсеенко В. В., Рашкес В. С. Применение деревянных опор на линиях электропередачи // Электричество. - 1970. - №3.
6. Шнелль Р. В., Китушин В. Г., Киселев А. П. Целесообразность применения деревянных опор на линиях электропередачи // Электричество. - 1975. - № 3.
7. Vantages economieas da utilizacao doa postes de madeira nostracados electricos // Electricidade. - 1975. - № 120.
8. Панфилова А. Д., Трегулова З. И. Продление срока службы опор высоковольтных линий // Энергетик. - 1969. - №10.
9. Лапчинский Х. Я., Русиня Н. А., Клещинский А. Я. Основные методы продления срока службы ЛЭП на деревянных опорах. Рига: ЛатИГТИ, 1972.
10. Рашкес В. С. Исследования мокроразрядных напряжений комбинированной изоляции «дерево-фарфор» при внутренних перенапряжениях // Электрические станции. - 1966. - № 2.
11. Народное хозяйство СССР в 1989г.: Стат. ежегодник. М.: Финансы и статистика, 1990.
12. Барг И.Г., Эдельман В.И. Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности. М.: Энергоиздат, 1985.
13. Шилкин П. М. Начно-технический прогресс в области электроснабжения тяги поездов // Электрификация и энергетическое хозяйство (ЦНИИТЭИ МПС). - 1987. - Экспр. 6.
14. Герман Л.А., Векслер М.И., Шелом И.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки. М.: Транспорт, 1987.
15. Мунькин В.В. Хозяйство электроснабжения в новых условиях // Электрическая и тепловозная тяга. - 1993. - № 9-10.
16. Мунькин В.В. Режим хозяйства электроснабжения //Локомотив. - 1997. - №7.
17. Крюков К. П., Новгородцев Б. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. -Л.: Энергия, 1979.
18. Кулешов А. П. Методика, технико-экономической оценки рационального материала опор линий электропередачи //Энергетическое строительство. - 1969. - № 11.
19. Подольский В. И. Эксплуатационные воздействия на опоры контактной сети электрифицированных железных дорог и повышение их надежности. Автореферат доктора технических наук, 1997.

20. Асс Э.Е., Гончаров А.Я., Папичев В.В. Монтаж устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. - М.: Транспорт, 1986. Марков А.С. монтаж контактной сети железных дорог. Справочник. - М.: Транспорт, 1985.
21. Устройство, сооружение и эксплуатация контактной сети и воздушных линий. Под ред. А.В. Фрайфельда. - М.: Транспорт, 1986. - 336 с.
22. Андриевский В. Н., Голованов А. Т., Зеличенко А. С. Эксплуатация воздушных линий электропередачи. Под ред. А.С. Зеличенко - М.: Энергия, 1976.
23. Горшин С.Н. О состоянии дела защиты древесины в стране и мерах по его улучшению./ «Защита древесины и целлюлозосодержащих материалов от биоповреждений». Сборник трудов всесоюзной конференции. Рига. 1989.
24. Горшин С.Н. Консервирование древесины. - М.: Лесная промышленность, 1977.
25. Яковлев В.Н. Совершенствование изолирующих конструкций и методов защиты воздушных линий продольного электроснабжения в условиях Средней Азии. Под ред. Чл.-корр. М.Н. Новикова - Ашхабад.: Ылым, 1994.
26. Справочник по сооружению линий электропередачи напряжением 35-750 кВ. Справ. Мастера. Под ред. М.А. Реута. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
27. Шнелль Р. В., Китушкин В. Г., Киселев А. П. Целесообразность применения деревянных опор на линиях электропередачи // Электричество. - 1975. - №3.
28. Кондратьев В. М., Прохоров В. М. Оценка целесообразности применения деревянных опор ВЛ 0,4-10 кВ // Энергетическое строительство. - 1979. - №8.
29. Михеев В. М., Яковлев В. Н. Дефекты деревянных элементов воздушных линий продольного электроснабжения // Локомотив. - 1996. - № 5.
30. Яковлев В.Н., Варфоломеев Ю.А. Защита деревянных опор воздушных линий. Ташкент. ФАН, 1992.
31. Валк Х.Я. Антисептирование опор линии электропередачи. - М.: Энергия, 1969.
32. Ломакин А.Д. Защита древесины и древесных материалов. - М.: Лесная промышленность, 1990.
33. Никонорова А.И. Консервирование столбов для воздушных линий связи. - М.: Связьиздат, 1951.
34. Максименко Н.А. Защитные средства для деревянных конструкций. Обзор информации. - М.: ВНИИПИЭИлеспром, 1986.
35. Варфоломеев Ю.А. Обеспечение долговечности изделий из древесины. - М.: ИЧП фирма «Ассоль», 1992.
36. Голенищев А.Н., Варфоломеев Ю.А. Участок глубокой пропитки древесины защитными средствами в деревообрабатывающем цехе // Деревообрабатывающая промышленность. - 1985. - №9.

37. Завод автоклавной пропитки древесины в леспромхозе/ Варфоломеев Ю.А., Агапов Д.В., Федотов В.И., Хизов А.П // Лесная промышленность. - 2000 - № 4.
38. Новый отечественный завод для автоклавной пропитки древесины/ Варфоломеев Ю.А., Агапов Д.В., Федотов В.И., Хизов А.П //Деревообрабатывающая промышленность. - 2001. - №2.
39. Варфоломеев Ю.А. Автоклавная модульная установка для глубокой пропитки древесины защитными препаратами // Лесная промышленность. - 2002. - № 4.
40. Варфоломеев Ю.А., Баданина Л.А. Влияние анизотропии строения и свойств древесины на расчет ее воздухопроницаемости //Лесной журнал. - 2002. - №6.
41. Варфоломеев Ю.А., Баданина Л.А. Расчет проницаемости древесины защитными препаратами при избыточном давлении //Лесной журнал. - 2003. - №4.
42. Варфоломеев Ю.А., Баданина Л.А. Исследование режимов защитной пропитки древесины в автоклавах // Лесной журнал. - 2002. - №5.
43. Варфоломеев Ю.А., Амбросевич М.А., Галиахметов Р.Н. Оптимизация рецептуры антисептиков для древесины с использованием алгоритмов симплекс – метода //Деревообрабатывающая промышленность. - 2002. - №3.
44. Варфоломеев Ю.А., Амбросевич М.А., Галиахметов Р.Н. Закономерности сезонного изменения оптимальных концентраций рабочих растворов для антисептирования сосновых пиломатериалов //Деревообрабатывающая промышленность. - 2002. - №6.
45. Варфоломеев Ю.А., Амбросевич М.А. Оптимизация рецептуры антисептиков по критерию стоимости с учетом защищающей способности // Лесной журнал. - 2002. - №3.
46. Галиахметов Р.Н., Варфоломеев Ю.А. Создание антисептиков для древесины с учетом механизма их действия на биологические объекты // Лесной журнал. - 2001. - №2.
47. Галиахметов Р.Н., Варфоломеев Ю.А., Галиахметова Ф.Ф. Оценка эксплуатационных свойств биологически активного препарата //Лесной журнал. - 2002. - №1.
48. Варфоломеев Ю.А., Амбросевич М.А. Метод экспертных оценок для выбора антисептика // Лесной журнал. - 2003. - №5.
49. Гиндуллин Ф.А., Гольштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоиздат, 1989.
50. Арайст Р.Ж., Сталтниманис И.О. Эксплуатация электрических сетей в сельской местности. - М.: Энергия, 1977.
51. Левшунов Р.Т., Новиков А.А., Иногамов А.А. Грязеразрядные напряжения фарфор дерево и вопросы возгорания деревянных опор./ Труды СибНИИЭ. - М.: Энергия, 1969.
52. Михайлов М.М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. Под ред. В.Т. Ренне. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
53. Маслов В.В. Влагостойкость электрической изоляции. М.: Энергия, 1973.

54. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. Под ред. Б.Н. Уголёва. М.: Лесная промышленность, 1989.
55. Михайлов М.М. Электроматериаловедение. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
56. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: Издательство иностранной литературы, 1949.
57. D. Andrews, I. Johnston. J.Amer. Chem.Soc. 46,640. 1924.
58. Гончаренко Ю.В. Исследование влагозащитных свойств электроизоляционных покровных нагревостойких эмалей. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Всесоюзный электротехнический институт имени В.И. Ленина. М.: 1965.
59. Эрлих И.М. Эксплуатация изоляционных материалов в условиях высокой влажности и температуры. М.: ВИНТИ, 1958.
60. Борисов Б.И., Мощанский Н.А. Диффузия агрессивных сред через полимерные материалы. Пластические массы, 1966.
61. Борисов Б.И. О количественной оценке действия полимеров от различных агрессивных жидкостей. Пластические массы, 1965.
62. Яманов С.А. Гидрофобизация диэлектриков кремнийорганическими соединениями. М.-Л.: Энергия, 1956.
63. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. М.: Гостехиздат, 1947.
64. Ильин Б.К. Природа адсорбционных сил. М.: Гостехиздат, 1952.
65. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная промышленность, 1975.
66. Торговников Г.Н. Диэлектрические свойства древесины. М.: Лесная промышленность, 1986.
67. Кречетов И.В. Сушка древесины. М.: Лесная промышленность, 1980.
68. Бирюков В.А. Процессы диэлектрического нагрева и сушки древесины. М.: Лесная промышленность, 1961.
69. Уголёв Б.Н. Испытания древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1965.
70. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
71. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1973.
72. Яковлев В.Н. Совершенствование изоляционных конструкций и методов защиты высоковольтных воздушных линий продольного электроснабжения в условиях Средней Азии. Автореферат диссертации на соискании учёной степени доктора технических наук. Омск. 1995.
73. Рихтера М., Бартакова Б. Тропикализация электрооборудования. Перевод с чешского. Под ред. С.А. Яманова. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
74. Семёнов Н.Н., Чирков Н.М. О поверхностной электропроводимости диэлектриков. ДАН СССР, 1946. т.51. №1.
75. Щербак. П.Н. Новая методика исследования кинетики сорбции влаги плёнками из высокомолекулярных соединений //Пластические массы. - 1961. - N8.
76. Авербах Б.Л. Некоторые физические аспекты разрушения. Разрушения. т.1. М.: Мир, 1973.

77. Луцейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. М.: Химия, 1988.
78. Харук Е.В. Проницаемость древесины газами и жидкостями. Новосибирск, 1962.
79. Арциловская Н.В. Исследование влагопроводности древесины //Труды института леса АН СССР. - 1953. - т IX.
80. Колосовская Е.А., Лоскутов С.Р., Чудинов Б.С. Физические основы взаимодействия древесины с водой. Новосибирск.: Наука. Сиб. Отделение. 1989.
81. Чудинов Б.С. Явление отрицательного набухания древесины поперек волокон при адсорбции. Свойства древесины ее защиты и новые древесные материалы //Труды института леса и древесины. М.: Наука. 1966.
82. Олехнович А.М., Туманова С.Д., Олехнович Ф.М. Электрические свойства древесины, модифицированной полиэтиленом. В сборнике. /Механическая технология древесины./ Вып 5. Минск: Выхшейшая школа. 1975.
83. Перелыгин Л.М. Древесиноведение. М.: Лесная промышленность, 1969.
84. Справочник по древесиноведению, лесоматериалам и древесным конструкциям. Кн.1. М - Л.: Гослесбумиздат, 1959.
85. Богомолов Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений. М.: Лесная промышленность, 1973.
86. Гемант А. Электрофизика изолирующих материалов Пер. с нем. : Изд-во "Кубуч", 1932.
87. Горшин С.Н. Защита древесины в Швеции. М.: Гослесбумиздат, 1959.
88. Вологдин А.И. Влияние различных антисептиков на физико-механические свойства древесины сосны. // Свойства древесины, ее защита и новые древесные материалы. - М.: Наука. - 1966.
89. Ломакин А.Д. Защита древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1990.
90. Рымина Л.В. Исследование технологии и возможностей химической защиты древесины способом нанесения защитных средств на поверхность. Сб.тр. ВНИИДрев. /Защита древесины от биоразрушения./ М.: 1984.
91. Калниньш А.Я. и др. консервирование и защита лесоматериалов. Справочник. М.: Лесная промышленность, 1971.
92. Лесная энциклопедия. т.1. Сов. энциклопедия, 1985.
93. Штегер Г. Электроизоляционные материалы. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
94. Познаев А.П. Измерение влажности древесины. М.: Лесная промышленность, 1965.
95. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954
96. Лыков А.В. Тепло-массоперенос. АН БССР. Минск: 1963.
97. Оснач Н.А. Проницаемость и проводимость древесины. М.: Лесная промышленность, 1964.

98. Денисов Ю.М., Сергеев А.И., Шаповалова Н.А., Яковлев В.Н. Электрическое сопротивление натуральной и консервированной древесины сосны //Электричество. - 1994. - № 4.
99. Михайловская К.П. Исследование влажностных характеристик электрических параметров древесины. Автореферат кандидатской диссертации. Красноярск.: СТИ, 1972.
100. Мятков И.Я. Экспериментальные исследования электрических свойств прессованной древесины березы, липы, ольхи, осины, бука. Автореферат кандидатской диссертации. Воронеж. 1954.
101. Леонтьев Н.Л. Влияние влажности на физико-механические свойства древесины. М.: Гослесбумиздат, 1962.
102. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984.
103. Чудинов Б.С. Теория тепловой обработки древесины. М.: Наука, 1968.
104. Чудинов Е.С., Андреев А. Вода в клеточной стенке. Красноярск, 1978.
105. Иванов Ю.М. К вопросу о взаимодействии между древесиной и влажностью //Труды ин-та леса и древесины АН СССР, 1958.
106. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерения. М.: Изд. Стандартов, 1991.
107. Никитин Н.Н. Химия древесины. М.: Изд. АН СССР. 1951.
108. Перельгин Л.М. Строение древесины. М.: Изд. АН СССР, 1954.
109. Ванин С.И. Древесиноведение. М.: Гослесбумиздат, 1943.
110. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. М.: Лесная промышленность, 1979.
111. Постников Л.Л. Исследование электрофизических свойств химически пластифицированной древесины березы. Автореферат кандидатской диссертации. Рига, 1972.
112. Справочник по электротехническим материалам. Том I. Электроизоляционные материалы, часть I. Свойства материалов. Под общ. ред. Ю.В. Корицкого и Б.М. Тареева. М. -Л.: Госэнергоиздат, 1958.
113. Серговский Л.С. О температуре древесины при камерной сушке // Деревоперерабатывающая и лесохимическая промышленность. - 1953. - № 3.
114. Максименко Н.А. Система биозащитных и биоогнезащитных средств для деревянных конструкций. // Биоповреждения в строительстве. Под ред. Ф.М. Иванова, С.Н. Горшина. - М.: Стройиздат, 1984.
115. Meierhofer U.A. Witterungsverhalten von salz und öl-imprognierten brett-schicht-holz. Holz asl Rol-und Werk-staff. - 1986. v. 44. - №5.
116. Варфоломеев Ю.А. Защитная обработка древесины //Обзор информация. Механическая обработка древесины. - М.: ВНИИПИЭлеспром. - 1987. - Вып.4.
117. ГОСТ 20022.2-80. Защита древесины. Классификация. М.: Изд-во стандартов. 1986.
118. Шаповалова Н.А., Яковлев В.Н. Защита деревянных элементов ВЛ 10 кВ железных дорог в условиях Приаралья. /Актуальные вопросы экологии бассейна Арала/ Тезисы докл. НТК молодых ученых и специа-

листов Средней Азии по экологическим проблемам бассейна Аральского моря. Ташкент. 1992.

119. Шаповалова Н.А., Яковлев В.Н., Варфоломеев Ю.А. Исследование гигроскопичности сосны, пропитанной химическими средствами защиты: Сборник научных трудов/ ЦНИИМОД Архангельск. 1994.

120. Яковлев В.Н., Шаповалова Н.А. Антисептирование древесины //Электрическая тепловозная тяга. - 1994 - № 4.

121. Шаповалова Н.А. Повышение надежности изоляционных конструкций высоковольтных линий железных дорог. /Перспективные системы и совершенствование устройств электрической тяги на железнодорожном транспорте и электромашиностроение./ Тезисы докладов конференции, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР А.Е. Алексеева. Л. 1991.

122. Шаповалова Н.А., Яковлев В.Н. Метод расчета электрического сопротивления натуральной и консервированной древесины сосны /Повышение надежности и эффективности полупроводниково-преобразовательной техники в устройствах электрических железных дорог. Сборник научных трудов./ ПГУПС. СПб. 1995.

123. Сердинов С.М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. 2-е изд. М.: Транспорт, 1985.

124. Кравченко В.А., Ментюкова А.М., Яковлев В.Н. Проектирование, эксплуатация и защита изолирующих конструкций высоковольтных воздушных линий. Ташкент: ФАН, 1993.

125. Богатенко Н.М., Карабанов А.В., Костенко М.В., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения и защита от них в сетях с изолированной нейтралью или с дугогасящей катушкой //Тез. раб. совещ. IV секции научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам повышения надежности долговечности изоляции сетей с изолированной нейтралью. Таллин, 1981.

126. Джуварлы Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью //Электричество. - 1953. - №-6. -С.18-27.

127. Armstrong H.R., Stoalting H.O., Veverka E.P. Impulse Studies on Distribution Line Construction //IEEE Trans. Power Appar. and Syst. - 1967. Vol. 86. - № 2.

128. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции: Пер. с венг. /Под ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1968.

129. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968.

130. Трухан А.Н. Эффективность различных способов заземления нейтрали сетей 6-10 кВ //Режимы нейтрали в электрических системах. Киев: Наукова думка, 1974.

131. Leith R.H. Jr. Jong C. W. Wood-pole Salvaging yields Ionanza //Elec. World. - 1977. Vol.184. - № 10.

132. Техника, высоких напряжений. 2-е изд., перераб. и доп. /Под ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1976.

133. Barry L.C., Ward I.H. High-Reliability Circuits Reform Aibly in lightning Hot Spot // Elec. Sight. Power. - 1966. Vol. 44. - № 10.

134. Dawson By.G. Lighting Performance and Design Aspects of Wood Pole overhead Lines in South-East Queensland Trans //Inst. Eng. Austral. - 1965. Vol.1. - № 2.

135. Харлей Ю. Ю., Дарвеница М., Лимборн Г.Ю. Проектирование воздушных линий электропередачи с улучшенными грязезащитными характеристиками //Воздушные линии электропередачи. СИГРЭ-68. Под ред. В.В. Бургсдорфа. М.: Энергия, 1970.

136. Limbourn G.I. Electrical Design of Distribution Lines //Australian Power Eng. - 1975. Vol.10. - № 2.

137. AIEE Transmission and Distribution Committee, Impulse flashovers of combinations of the line insulators, air gaps and wood structural members //AIEE Trans. Power Appar. and Syst, 1956.

138. Darveniza M., Limbourn G.I., Prentise .S.A. Line Design and electrical properties Wood //IEEE Trans. Power Appar. and Syst. - 1967. Vol. PAS-86.

139. Руководящие указания по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока напряжением 3-220 кВ. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954.

140. Егоров В.В. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в устройствах электрической тяги. Профилактические испытания изоляции.: М. Маршрут, 2004.

141. М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения.: Л. Наука, 1988.

142. Карахин А.С. Влияние возгорания опор и траверс линий электропередач напряжением до 10 кВ на надежность их работы и безопасности движения по дороге //Совершенствование методов эксплуатации и разработка способов от возгорания воздушных линий электропередачи железных дорог в районах с загрязненной атмосферой. Сборник трудов международной конференции. Ташкент: ТашиИИТ, 1989.

143. Ильичев В.Д., Титова Е.В. Защита от биоповреждений - актуальная научно-техническая проблема // Биоповреждения в строительстве. М.: Стройиздат, 1984.

144. Понеделько А.И., Грязнов Г.И. Эксплуатация деревянных опор линий электропередачи 110, 35 и 6 кВ // Электрические станции. - 1961. - №4.

145. О мерах борьбы с возгоранием древесины опор линий электропередачи // Электрические станции. - 1954. - №4.

146. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой. Л.; Энергоатомиздат, 1973.

147. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. Л.; Энергоатомиздат, 1983.

148. Абрамов В.Д., Хомяков М.В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1976.

149. Казанцев В.Н. Надежность работы фарфоровых изоляторов линий электропередачи 35-600 кВ // Надежность и экономичность энергосистем. Новосибирск: Наука, 1971, Т. 1.

150. Воскресенский В.Ф. Электрическая изоляция в районах с загрязненной атмосферой. М.: Энергия, 1971.

151. Вопросы эксплуатации изоляторов линий электропередачи и подстанций. БТН ОРГРЭС. М., 1968.

152. Лебедев Г.А. Токи утечки по линейным изоляторам при деревянных опорах // Электричество. - 1947. - №3.

153. Грязнов Г.И., Рыцлин А.В. Борьба с возгоранием деревянных опор // Электрические станции. - 1957. - №3.

154. Sebesta Danald Grounded brackets Stop poletop fires // Elec. World. - 1978. Vol. 190. - № 6.

155. Филлипов О.О., Дордин Ю.Р., Крюков Ю.З. Анализ надежности ВЛ 35-110 кВ на деревянных опорах Магаданэнерго // Электрические станции. - 1989. - № 7.

156. Кравченко В.А., Кесельман Р.Л., Курганский М.И., Ментюкова А.М., Орлова Н.И., Рахимов Х.Р., Рипка Н.М. Об учете метеорологических факторов при выборе изоляции ВЛ и ОРУ // Тез. докл. НТК «Исследование, изучение, выбор и эксплуатация изоляции ВЛ и подстанций в районах с промышленным загрязнением». Ташкент: УзНИИТИ, 1979.

157. Исследование загрязненной изоляции // Перенапряжения и координация изоляции. СИГРЭ 82. Под ред. А.К. Лоханина. М.: Энергоатомиздат, 1985.

158. Вольпов К.Д., Майкопар А.С. Регистрация токов утечки по гирляндам изоляторов линий 110-220 кВ на деревянных опорах в районах с промышленными загрязнениями // Электричество. - 1977. - №5.

159. Филлипов О.О. повышение надежности и грозоупорности воздушных линий электропередачи 35-220 кВ на деревянных опорах в условиях Крайнего Севера: Автореф. дисс. канд. тех. наук. Новосибирск, 1990.

160. Крастин Г.Э., Мерхалев С.Д., Яковлева Т.В. Влияние проводимости атмосферной влаги на разрядные характеристики загрязненной изоляции // Передача энергии постоянным и переменным током/ Тр. НИИПТ. Л.: Энергия, 1972.

161. Reducing firer jn Wood poles // Elec. World. - 1975. Vol. 164. - №6.

162. Leith R.H. Jr. Jong C.W. Wood-pole Salvaging jields Ionanza //Elec. World. - 1977. Vol.184. - № 10.

163. Hespelt George G. Pole fires and nonmeta llic ground-wire fasteners // IEEE Power End. Soc. Text "A" Pap. Summer Meet. Mexico city; New York, 1977.

164. Barry L.C., Ward I.H. High-Relliability Cireuits Reform Ably in lightning Hot Spot // Elec. Sight. Power. - 1966. Vol. 44. - № 10.

165. Filter R. The influence of wood pole preservatives on wood fire and electrical safety // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. - 1984. Vol.103. - №10.

166. Шаповалова Н.А., Юшко В.И., Михайлов С.С. Нелинейные колебания тока при предпожарных ситуациях. /Совершенствование методов эксплуатации и разработка способов от возгорания воздушных линий электропередачи железных дорог в районах с загрязненной атмосферой. Сборник трудов международной конференции. Ташкент: ТашиИИТ, 1989.

167. Шергунова Н.А., Носырев Д.Я. Поверхностное и объемное сопротивление древесины изолирующих и опорно-поддерживающих конст-

рукций. /Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин. Сборник трудов международной конференции. Самара: СамГТУ, 2003.

168. Шергунова Н.А. Надежность двухцепных воздушных линий системы продольного электроснабжения железных дорог в районах с загрязненной атмосферой. // Вестник. - 1999. - № 4.

169. Рахимов Х.Р., Орлова Н.И. Методы комплексного исследования атмосферных процессов, влияющих на работу изоляции ВЛ // Тез. докл. III Всесоюз. НТК «Изоляция воздушных линий электропередачи и распределительных устройств высокого напряжения в условиях природного и промышленного загрязнения». Ташкент, 1973.

170. Молоснова Т.И., Субботина О.И., Чанышева С.Г. Климатические последствия хозяйственной деятельности в зоне Аральского моря. / Под редакцией А.Д. Джураева. Гидрометеоиздат, 1987.

171. Боровский В.М., Корниенко В.А. Современные аспекты проблемы Аральского моря // Пробл. осв. пустынь. - 1979. - №2.

172. Черненко И.М. Водно-солевой баланс и использование высыхающего Арала // Пробл. осв. пустынь. - 1983. - №3.

173. Левшунов Р.Т. Влияние вида увлажнения на грязеразрядные напряжения изоляторов // Электрические станции. - 1976. - №3.

174. Левшунов Р.Т. Выбор линейной изоляции в районах с загрязненной атмосферой // Промышленная энергетика. - 1982. - №5.

175. Барг И. Х., Валк Х.Я., Комаров Д.Т. Совершенствование обслуживания электрических сетей 0,4-20 кВ в сельской местности. М.: Энергия, 1980.

176. Венцель Е.С. Теория надежности. М.: Наука, 1964.

177. Барг И.Г., Лазарева Л.Е., Эдельман В.И. Модели и характеристики надежности ВЛ 35-500 кВ // Электрические станции. -1984. - №2.

178. Беленков Д.А. Вероятностный метод исследования антисептиков для древесины. Свердловск: Уральский университет, 1991.

179. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М: Физико-математическая литература, 1962.

180. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. Учебное пособие вузов. Изд. 6-у, - М.: «Высшая школа», 1998.

181. Колде Я.К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Высшая школа», 1991.

182. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991.

183. Аганбегян А.Г. Перспективное отраслевое планирование: Экономико-математические методы и модели. - Новосибирск, 1986.

184. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2000.

185. Варфоломеев Ю.А., Амбросевич М.А., Шергунова Н.А. Оптимизация выбора консервантов деревянных элементов опорно-поддерживающих конструкций воздушных линий и контактной сети. /Актуальные проблемы развития транспортных систем Российской Феде-

рации. Сборник научных трудов с международным участием. Самара: СамГАПС, 2004.

186. Шергунова Н.А., Носырев Д.Я. Комбинированная изоляция «фарфор-дерево» воздушных линий и контактной сети. /Актуальные проблемы развития транспорта России: стратегические, региональные, технические. Труды международной научной конференции, посвященной 75 летию РГУПС. Ростов: РГУПС, 2004.

187. Шергунова Н.А. Методология экспериментальных исследований электрофизических свойств натуральной и пропитанной древесины воздушных линий и контактной сети. /Актуальные проблемы развития транспорта России: стратегические, региональные, технические. Труды международной научной конференции, посвященной 75 летию РГУПС. Ростов: РГУПС, 2004.

188. Шергунова Н.А., Носырев Д.Я. Электроизоляционные свойства консервированной препаратом ПХДС-Т древесины. /Актуальные проблемы развития транспортных систем Российской Федерации. Сборник научных трудов с международным участием. Самара: СамГАПС, 2004.

189. Шергунова Н.А. Повышение надежности деревянных изоляционных конструкций воздушных линий и контактной сети. /Актуальные проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. Материалы региональной научно-практической конференции. Самара: Куйбышевская ж.д., 2004.

190. Шергунова Н.А., Носырев Д.Я., Шаповалов А.Н. Проблема совершенствования комбинированной изоляции «фарфор-дерево» контактной сети и воздушных линий. /Актуальные проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. Материалы региональной научно-практической конференции. Самара: Куйбышевская ж.д., 2004.

Таблица 1

АНАЛИЗ ОТКЛЮЧЕНИЙ ПО ГОДАМ (ЧИСЛИТЕЛЬ) И ИХ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ (ЗНАМЕНАТЕЛЬ)

Отключение	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Аварийное*	18	23	26	78	95	57	37	46	64
	78.8	98.5	155.1	301.85	39.45	203.4	150	171.5	217.5
Плановое	151	151	148	64	146	133	123	154	172
	410.45	410.45	418.1	207.25	461.1	438.1	410.1	446.15	565
Влияние погоды	4	3	8	12	33	18	4	10	16
	32.3	28.2	45.35	39.4	170.45	111.4	25.1	38.4	74.4

\* Под аварийными понимаются все отключения, которые произошли от действия РЗ и АПВ, за исключением многократных неуспешных попыток отключения ВЛ (в этом случае все отключения от одного повреждения принимались за одно).

Таблица 2

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКЛЮЧЕНИЙ ПО ГОДАМ (ЧИСЛИТЕЛЬ) И ИХ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ (ЗНАМЕНАТЕЛЬ)

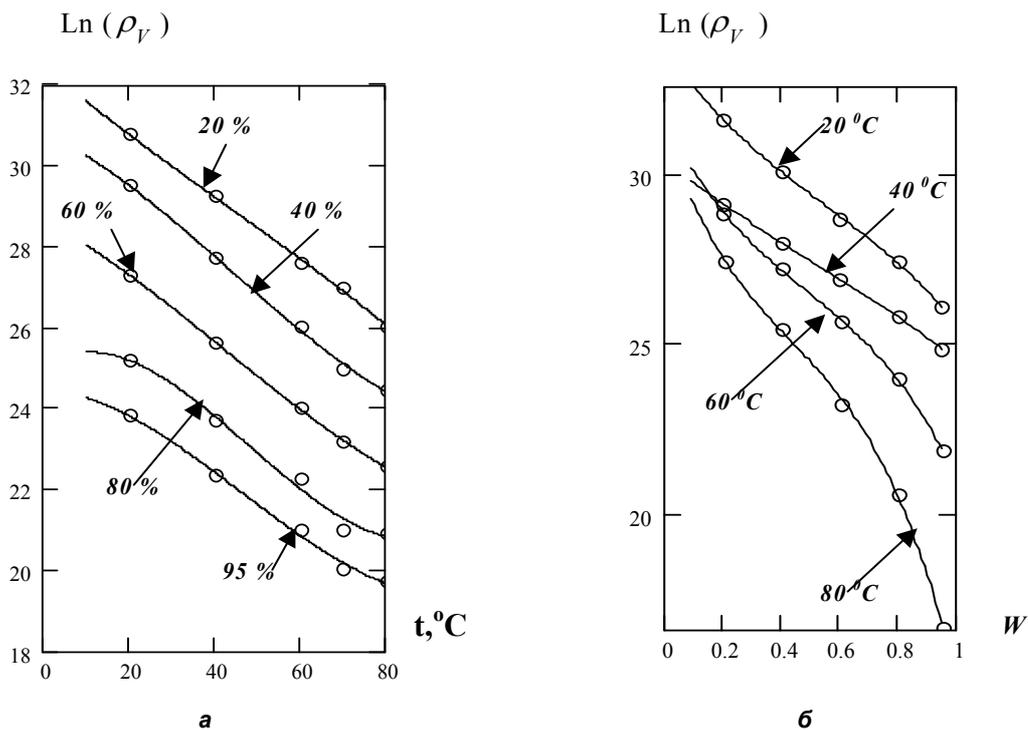
Причина отключения	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Повреждения трансформатора типа ОМ	12	17	3	9	11	10	2		7
	53.3	70.4	12.15	40.15	48.2	27.2	15.25		30.45
	2	1			9	3		13	14
Возгорание и слом траверс	4.6	3.3			18.25	8.1		107.2	58.3
	4	1	1	5	8	2	2	11	14
Возгорание, падение опор	10.8	4.5	3.45	126.1	43.45	11.15	33.5	96.2	58.3
				1		1	2		
Обрыв и схлест проводов				8.4		1.2	32.5		
		2	2		6	1	2	3	3
Слет изоляторов		2.5	3.35		31.4	6.35	22.25	16.2	31.2
							1		
Набросы и нахлесты							10.25		
		1	2		2		1		
Повреждения разрядников РЛНД-10		9.45	17.3		10.1		10.25		
ИТОГО									

Таблица 3

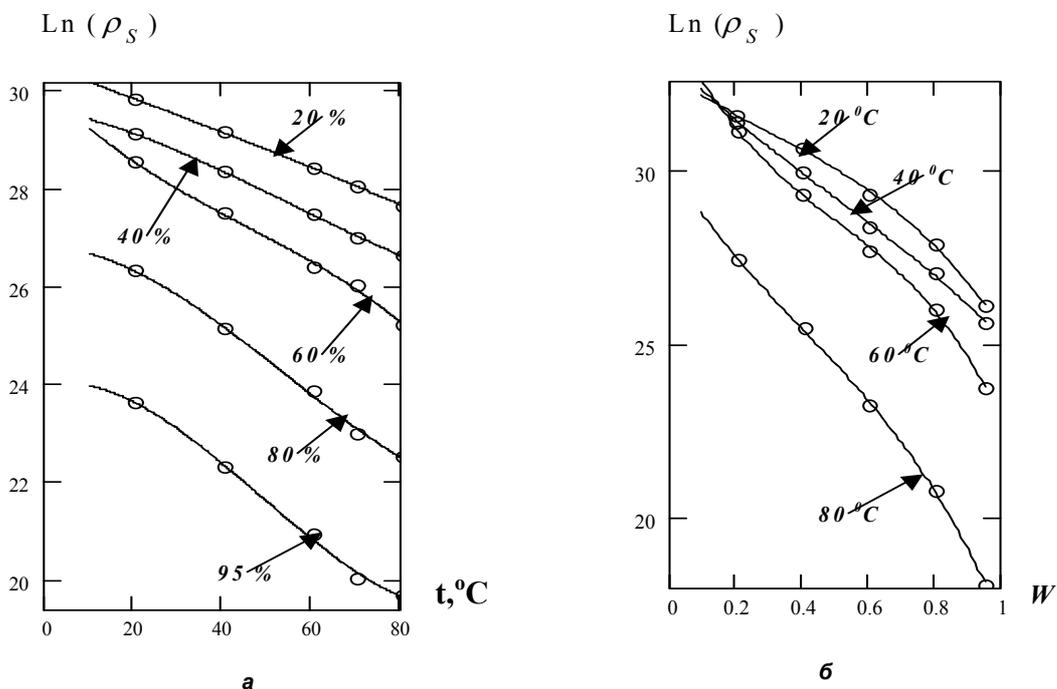
## АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКЛЮЧЕНИЙ ПО ГОДАМ (ЧИСЛИТЕЛЬ) И ИХ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ (ЗНАМЕНАТЕЛЬ)

Причина отключения	1993	1994	1995	1996	1997	6 мес. 1998
Повреждения трансформатора типа ОМ	31	35	50	58	73	30
	219	288,2	260,8	415	588,7	174,1
Возгорание и слом траверс	18	15	11	20	29	5
	118,5	131	35	94	181,8	45,3
Возгорание, падение опор	11	4	15	26	23	5
	70,1	35	88,7	142,7	123,4	18,7
Обрыв и сжест проводов	38	41	65	57	50	24
	271,9	340	567,5	263,1	335	161,7
Слет изоляторов	6	11	15	15	47	23
	62,3	65,3	151,2	165,1	502,7	131
Набросы и нахлесты	69	55	67	42	50	16
	561,1	293,2	359,8	322,6	325,7	92,1
Повреждения разрядников РЛНД-10	12	12	12	11	3	1
	87,4	39,2	62,6	76	10,6	6Д

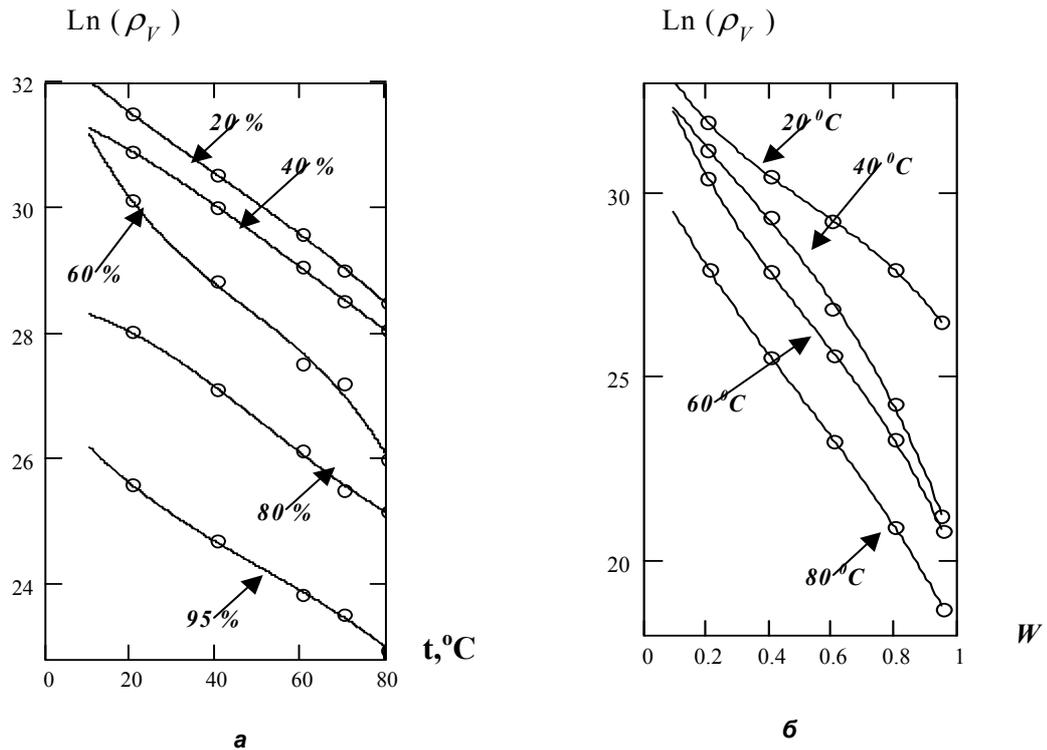
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2



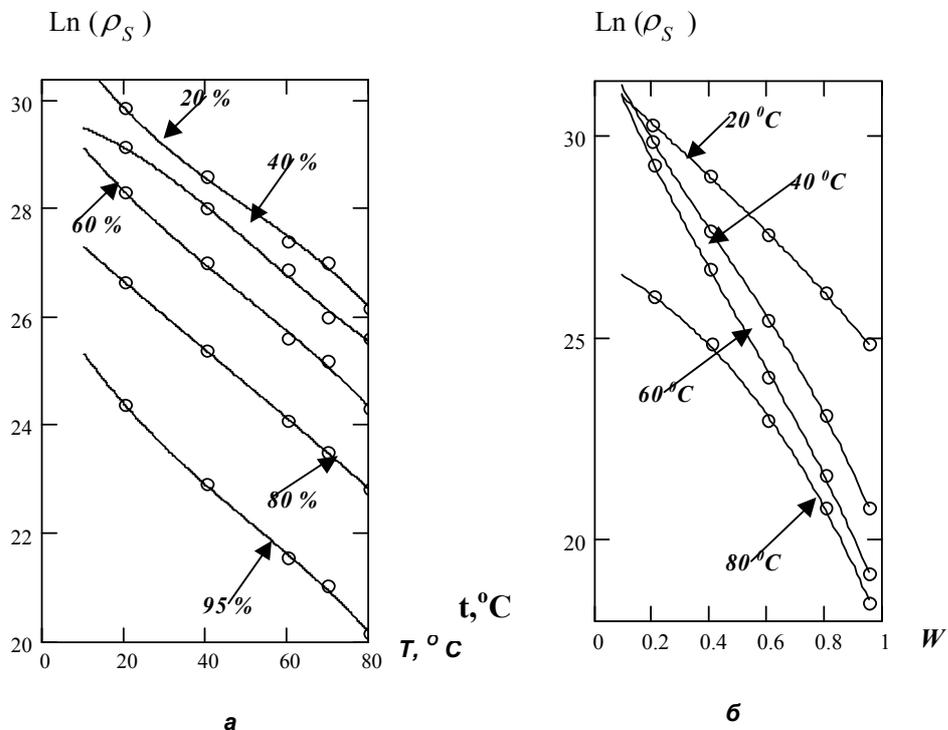
**Рис. 1** Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре воздуха (б). Антисептик ХМ-11 50% концентрации рабочего раствора



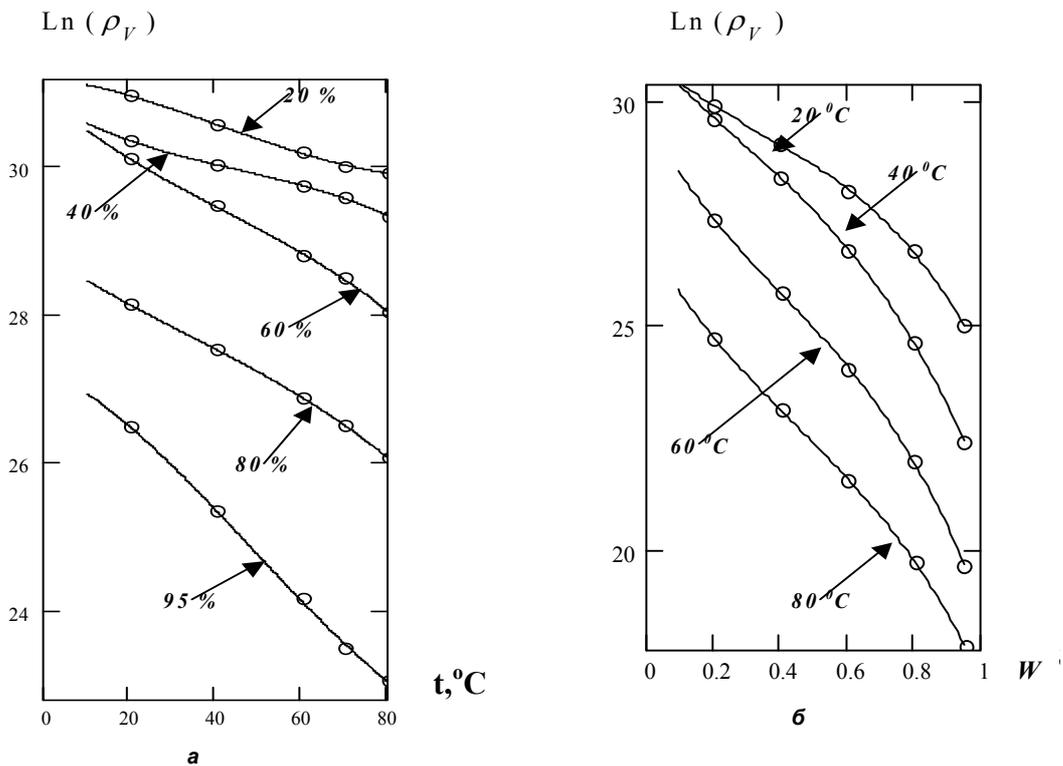
**Рис. 2** Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре воздуха (б). Антисептик ХМ-11 50% концентрации рабочего раствора



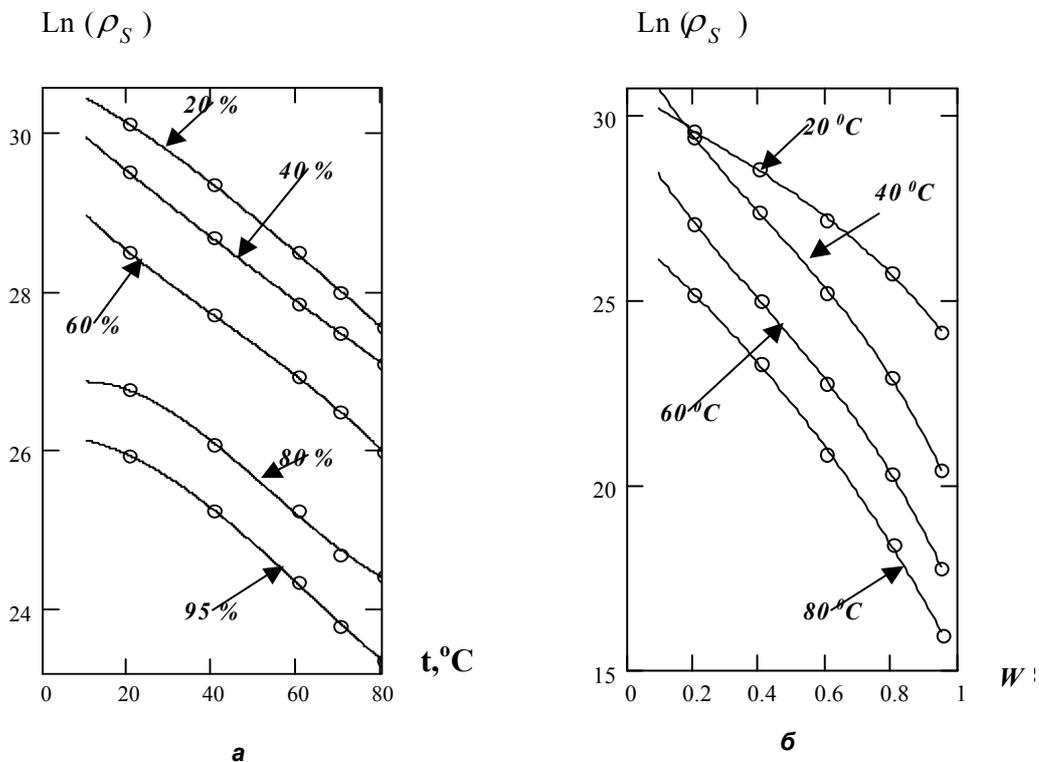
**Рис. 3** Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Консервант ХМ-11 75% концентрации рабочего раствора



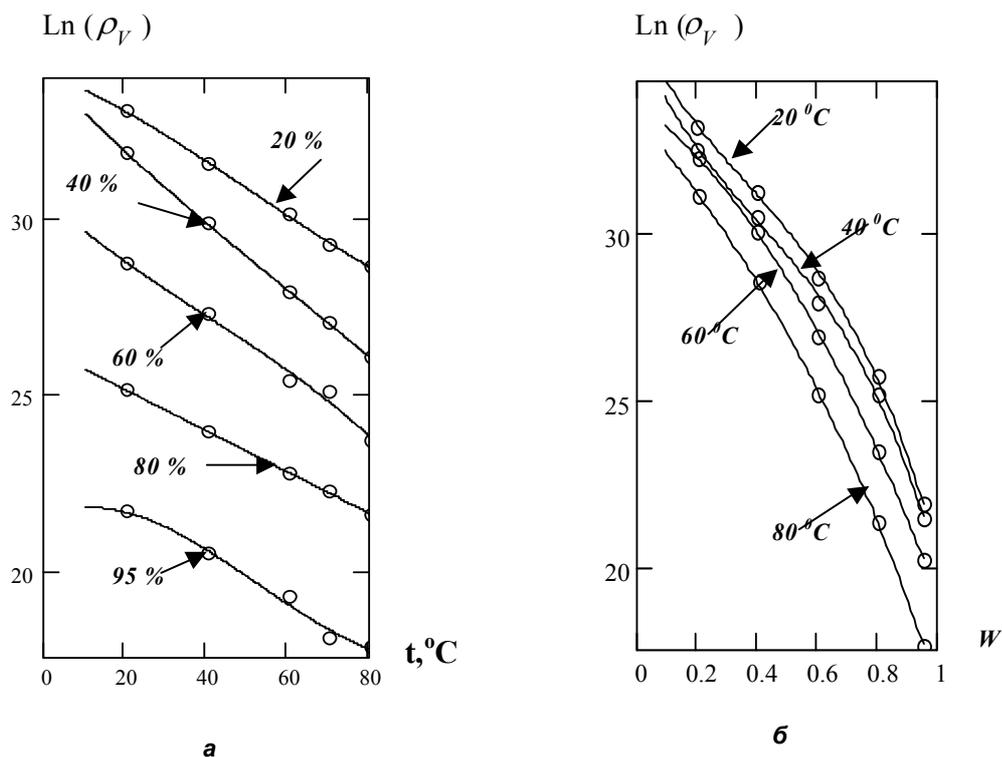
**Рис. 4** Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Консервант ХМ-11 75% концентрации рабочего раствора



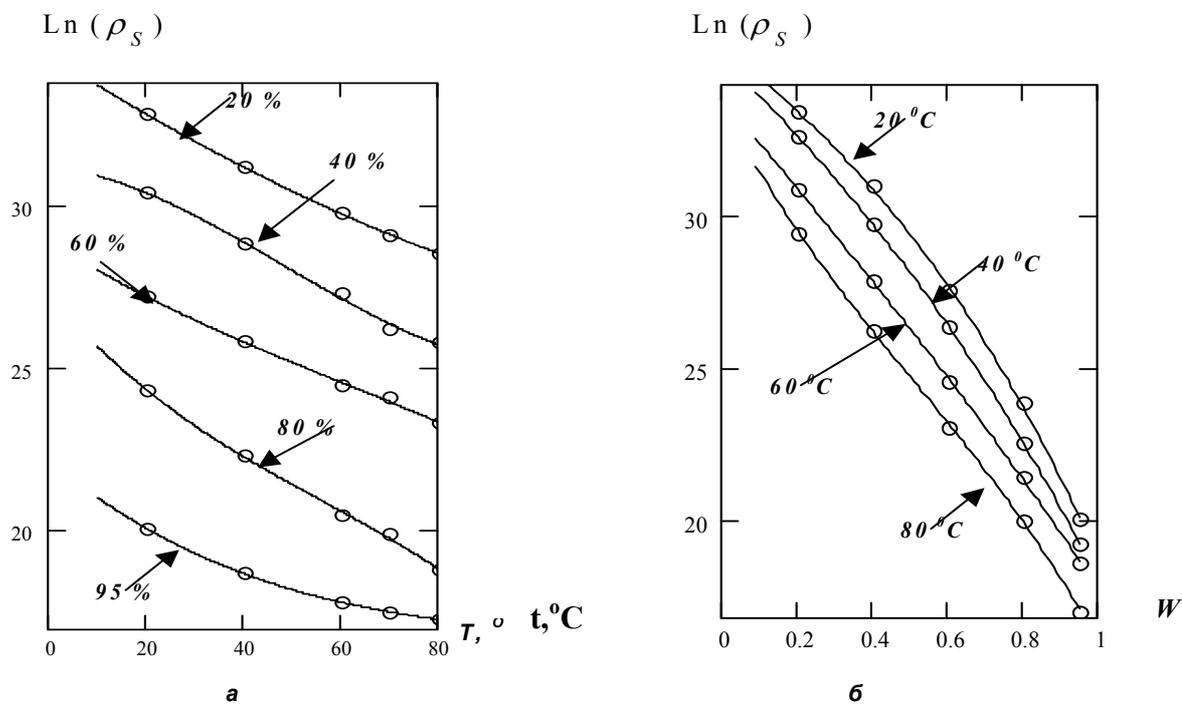
**Рис. 5. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Консервант ХМ-11 100% концентрации рабочего раствора**



**Рис. 6. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Консервант ХМ-11 100% концентрации рабочего раствора**



**Рис. 7. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ПХФН 50% концентрации рабочего раствора**



**Рис. 8. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ПХФН 50 концентрации рабочего раствора**

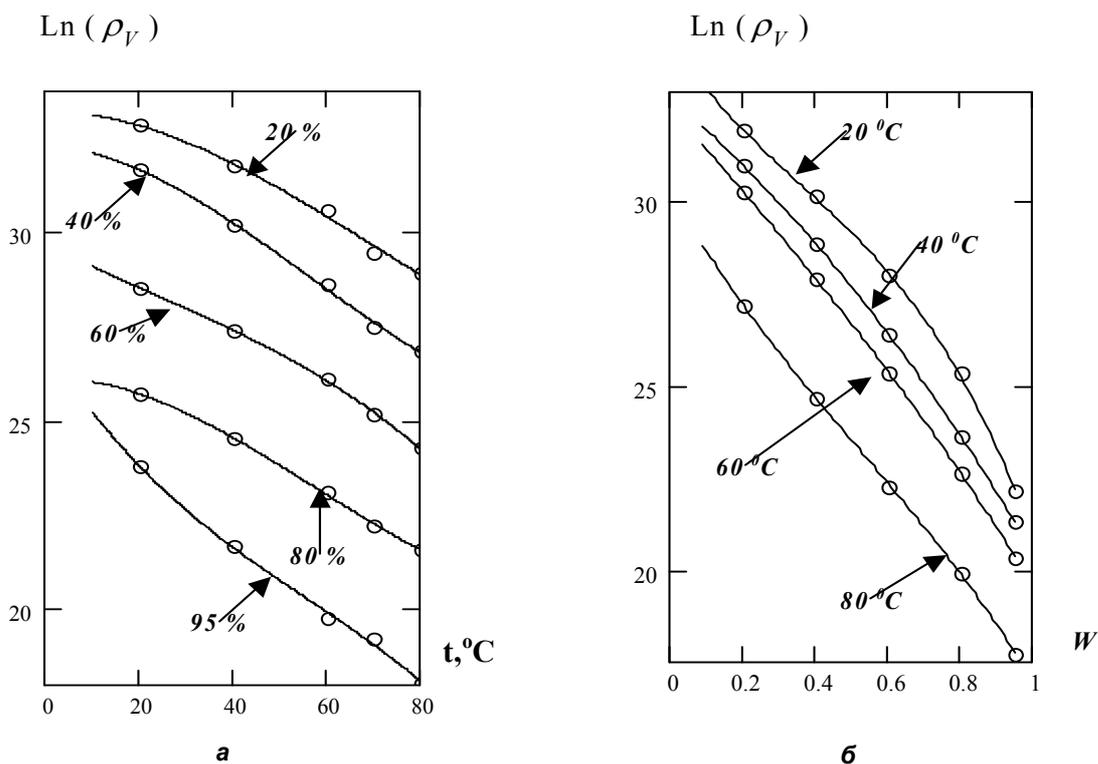


Рис. 9. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ПХФН 75% концентрации рабочего раствора

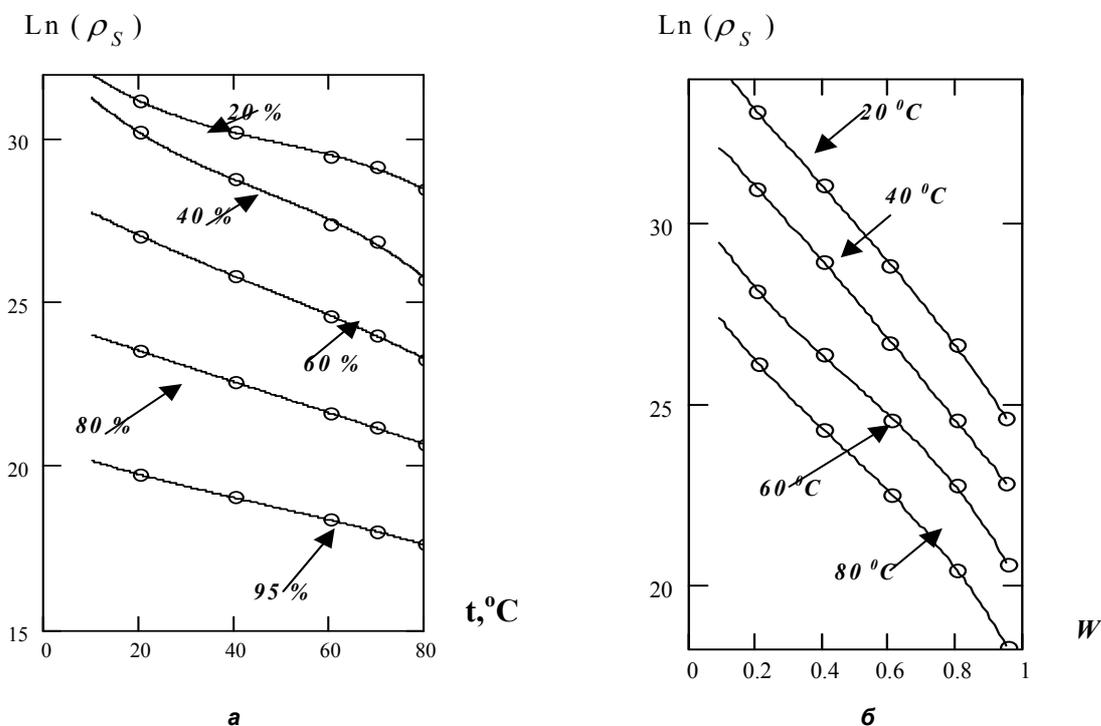


Рис. 10. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ПХФН 75% концентрации рабочего раствора

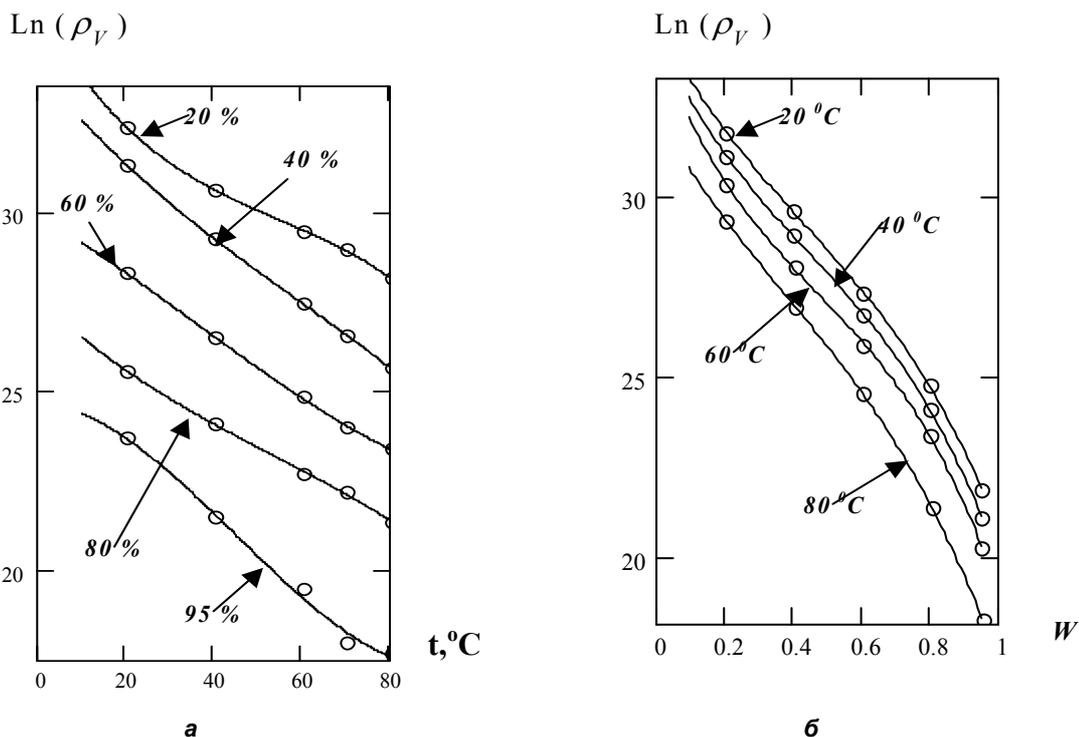


Рис. 11. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ПХФН 100% концентрации рабочего раствора

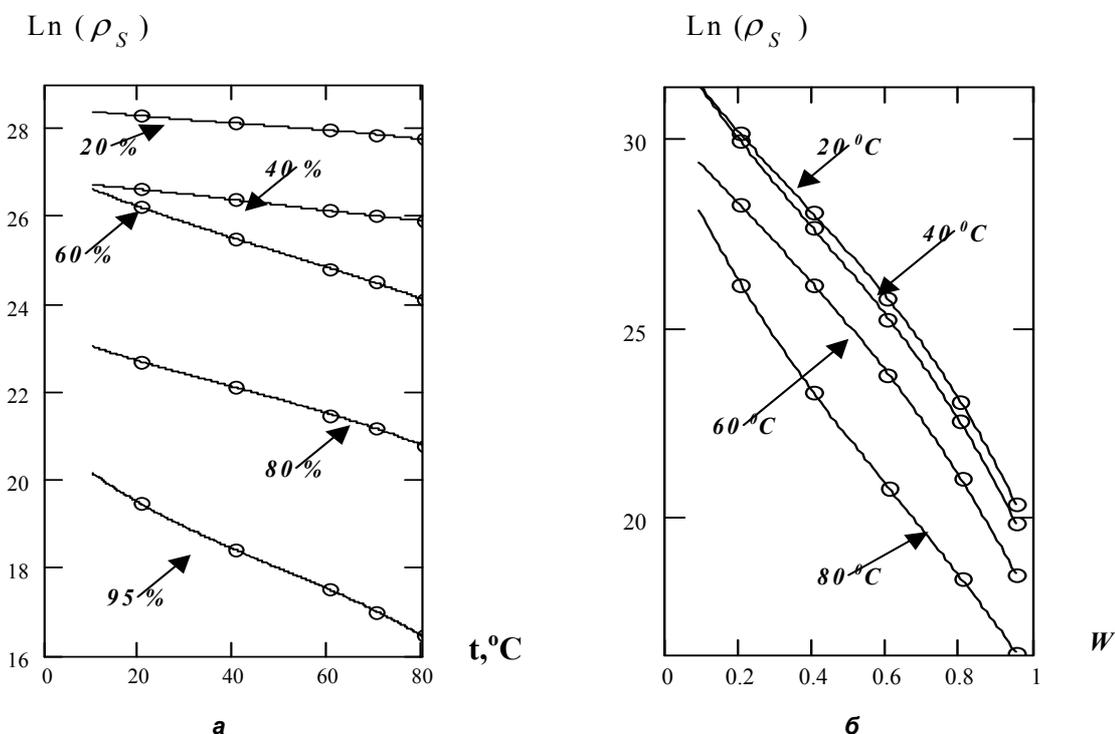
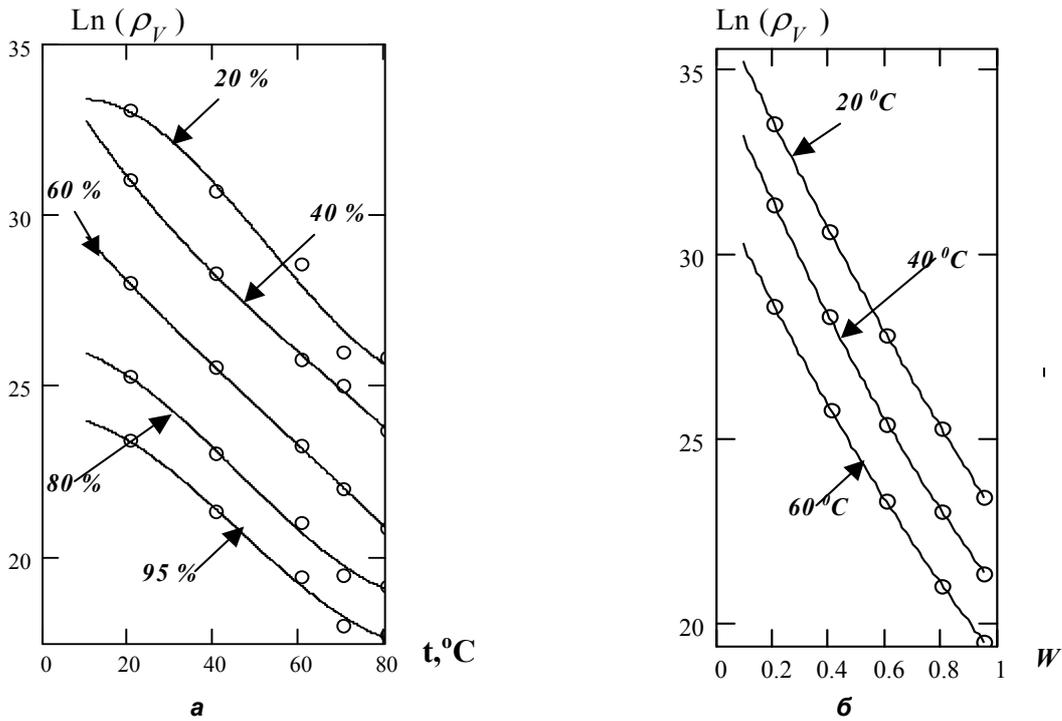
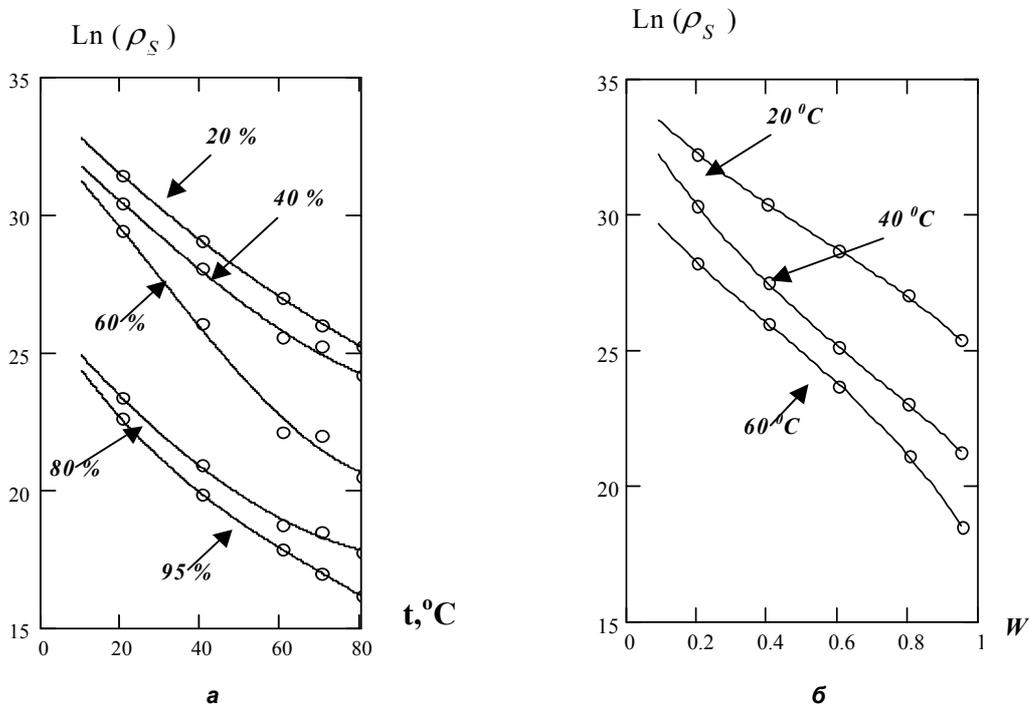


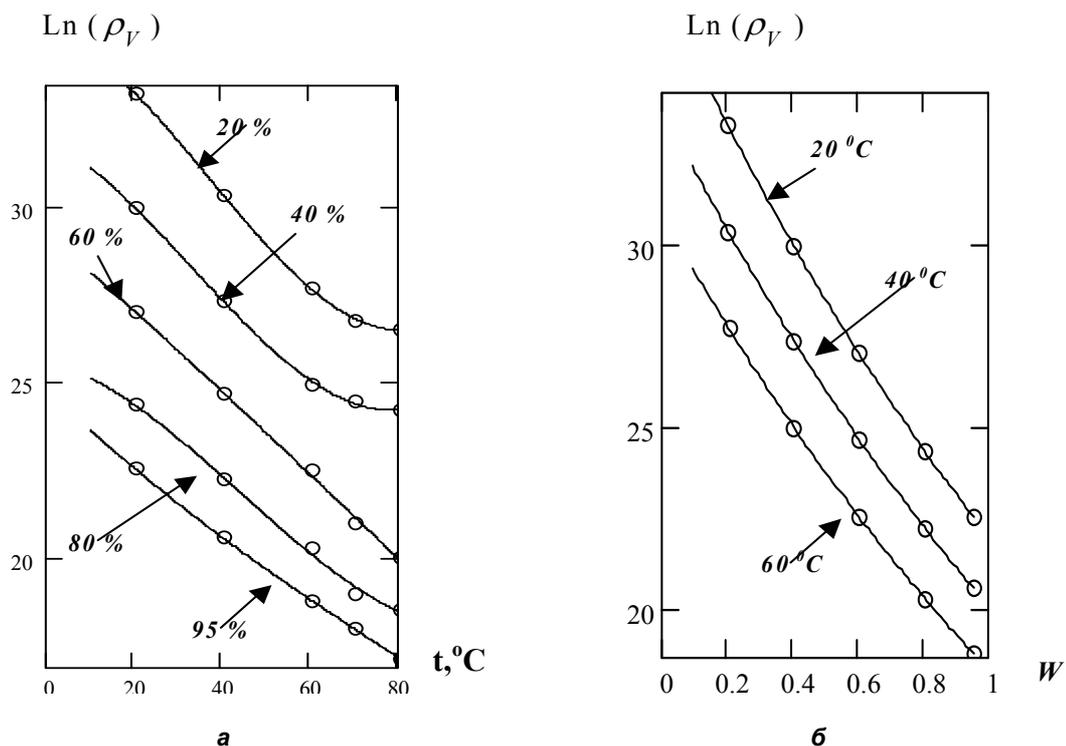
Рис. 12. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ПХФН 100% концентрации рабочего раствора



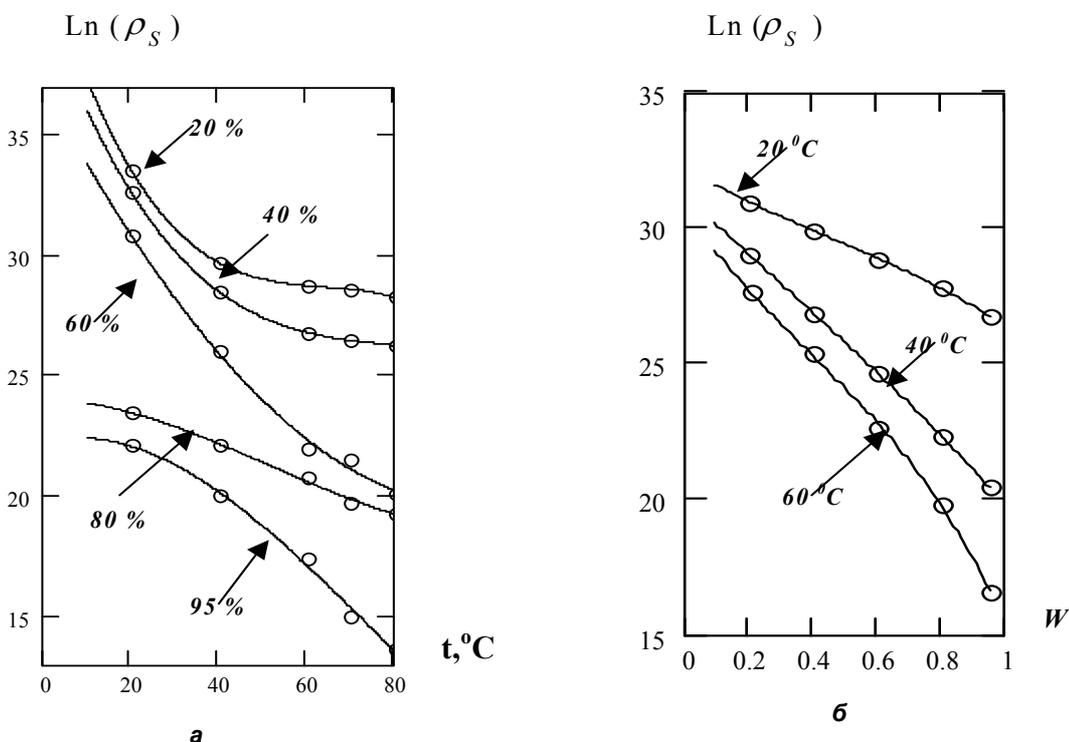
**Рис. 13. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КФА 100% концентрации рабочего раствора**



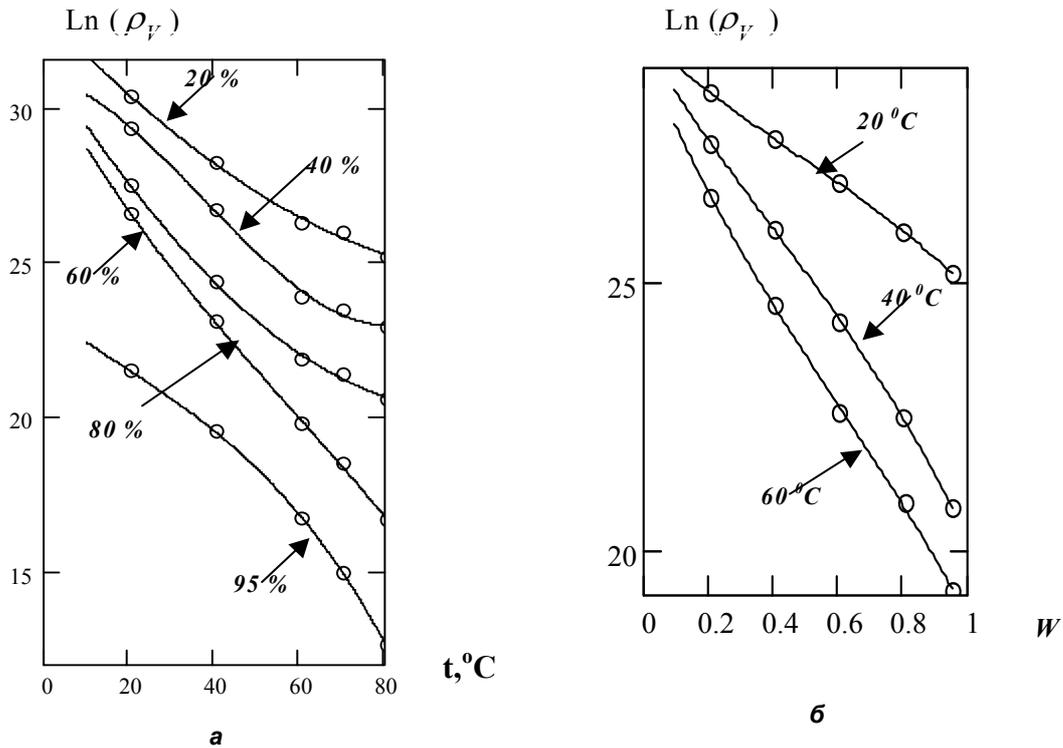
**Рис. 14. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик КФА 100% концентрации рабочего раствора**



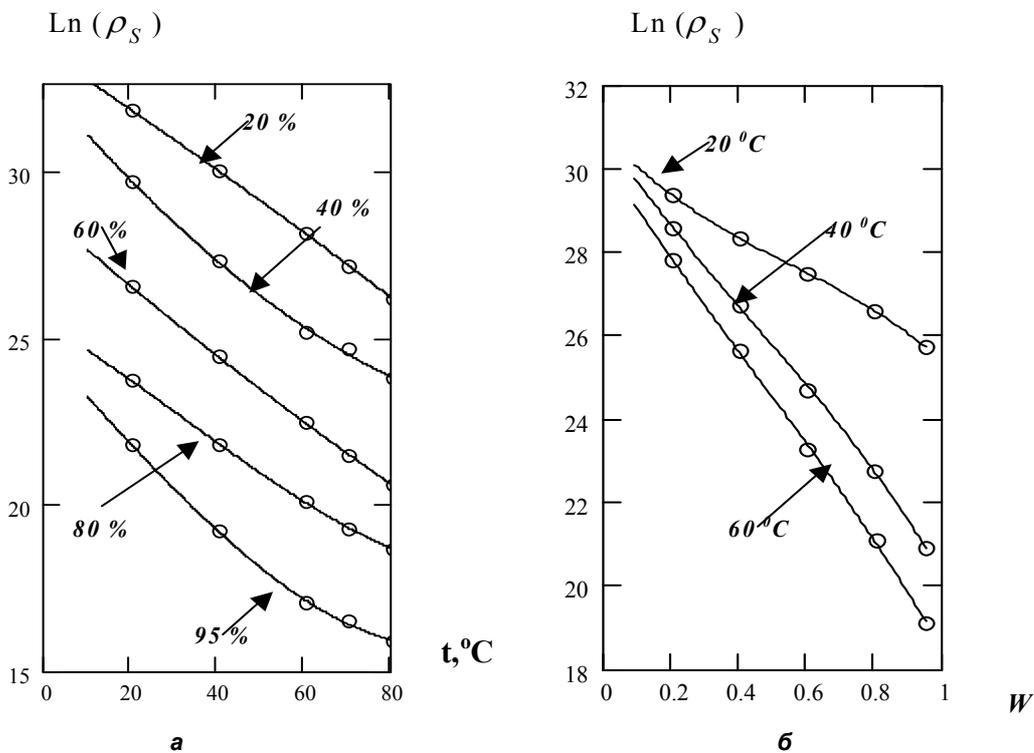
**Рис. 15.** Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ФА 100% концентрации рабочего раствора



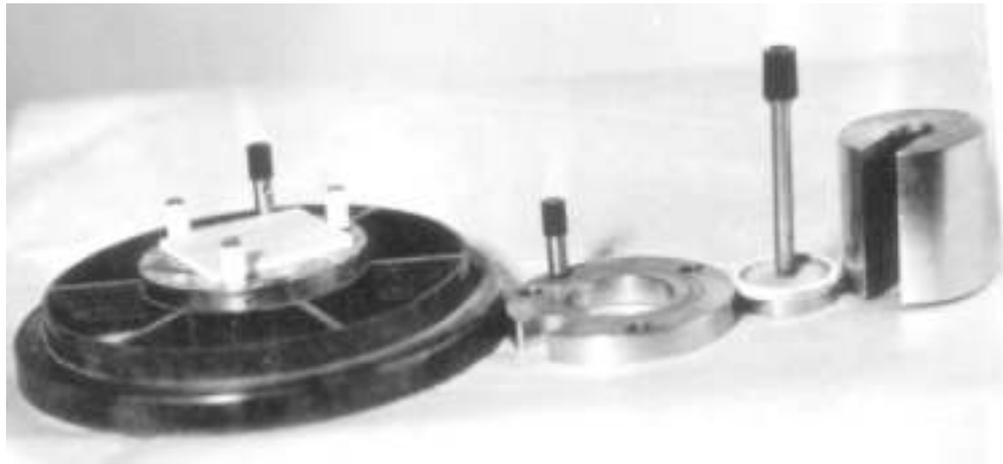
**Рис. 16.** Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ФА 100% концентрации рабочего раствора



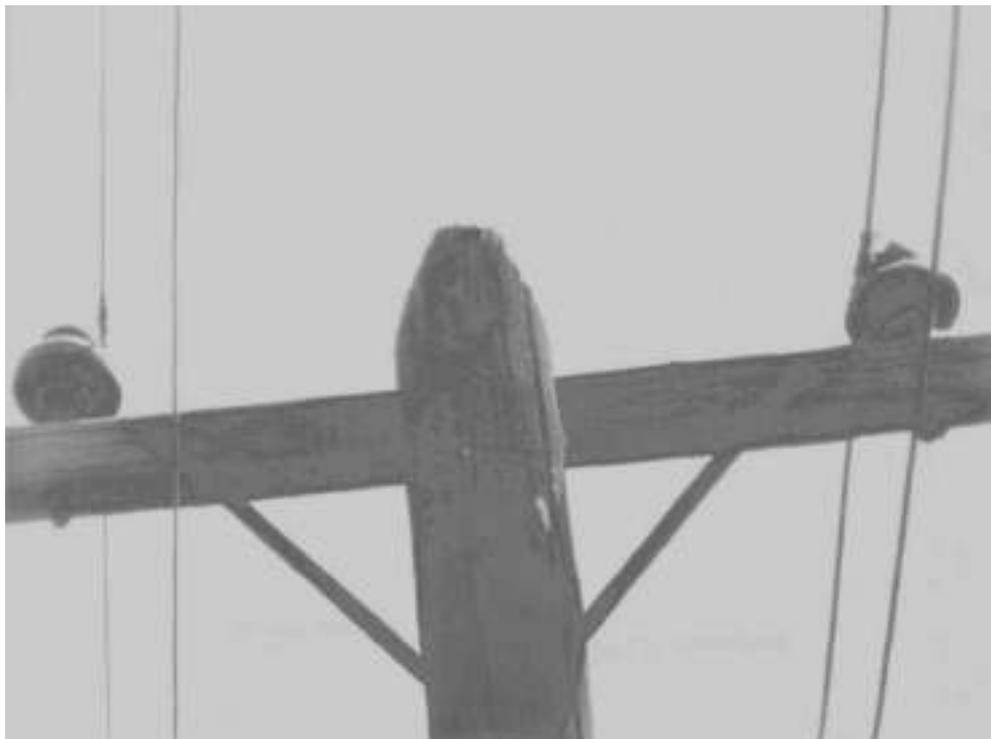
**Рис. 17. Зависимость логарифма сопротивления (объемного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ФН 100% концентрации рабочего раствора**



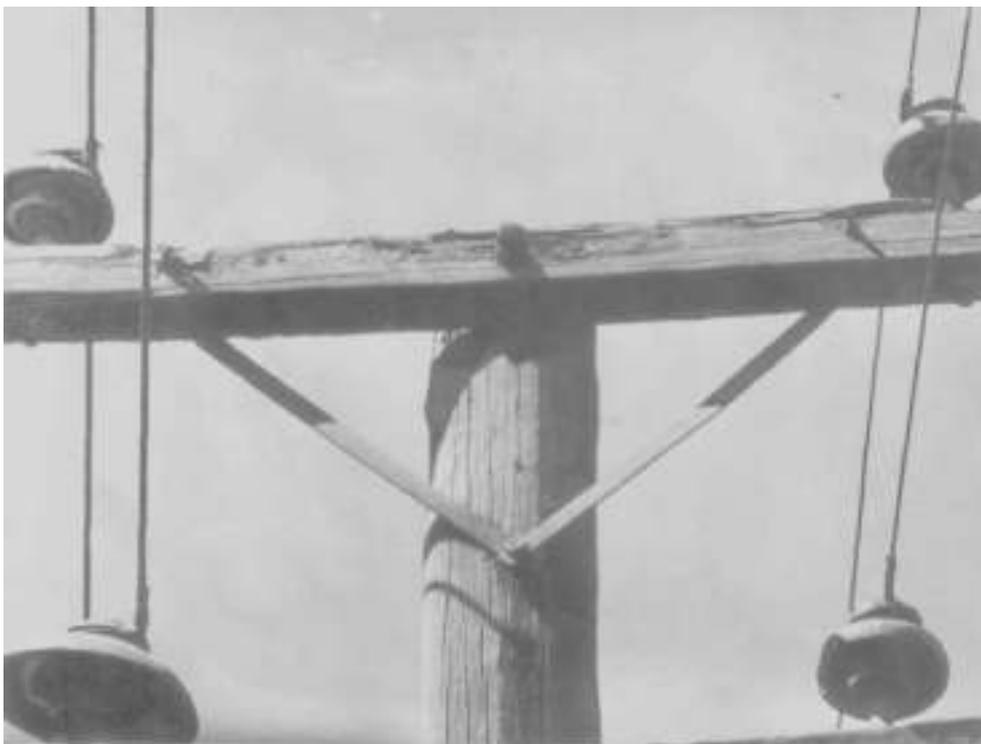
**Рис. 18. Зависимость логарифма сопротивления (поверхностного) пропитанной древесины сосны от температуры при постоянной относительной влажности воздуха (а) и от влажности при постоянной температуре (б). Антисептик ФН 100% концентрации рабочего раствора**



**Фото 1. Электродное устройство для определения электрического сопротивления древесины. Слева направо: высоковольтный, охранный и измерительный электроды; груз. Образец древесины расположен на ВЭ**



**Фото 2. Биоразрушение верхней части стойки опоры**



**Фото 3. Биоразрушение и частичный отлуп на поверхности древесины траверсы**



**Фото 4. Прогрессирующий очаг биоразрушения стойки опоры на участке ВЛ 10 кВ (Рзд. 13, км 3612)**



**Фото 5. Поражение опоры термитами**



**Фото 6. Разрушение древесной опоры термитами. Лепки термитов на поверхности древесины**



**Фото 7. Коррозионное разрушение железобетонного пасынка на участке Абадан - Кырк – Кыз**



**Фото 8. Креозотовая пропитка опоры вытекает из клеток древесины под действием солнечной радиации**



**Фото 9. «Выветривание» цементного камня с обнажением заполнителя бетона железобетонной опоры одноцепной ВЛ – 10 кВ на участке Абадан-Кырк-Кыз**



**Фото 10. Продольные трещины в центрифугированных опорах ВЛ – 10 кВ. Участок Абадан-Кырк-Кыз**



**Фото 11. Разрушение фундамента металлической опоры на ст. Абдан ВЛ – 10 кВ**



**Фото 12. Коррозионное повреждение пасынка. Участок Раушан**



**Фото 13. Разрушение защитного слоя бетона пасынка опоры установленной на поливных землях. Участок Раушан – Кунград**



**Фото 14. Разрушение древесины опоры ВЛ 10 кВ на участке Мары-Дорт-Кую. Срок службы опоры более 15 лет**



**Фото 15. Разрушение древесины опоры солями у поверхности земли. Участок ВЛ - 10 кВ Айдан - Рзд. 121. 1991 г.**



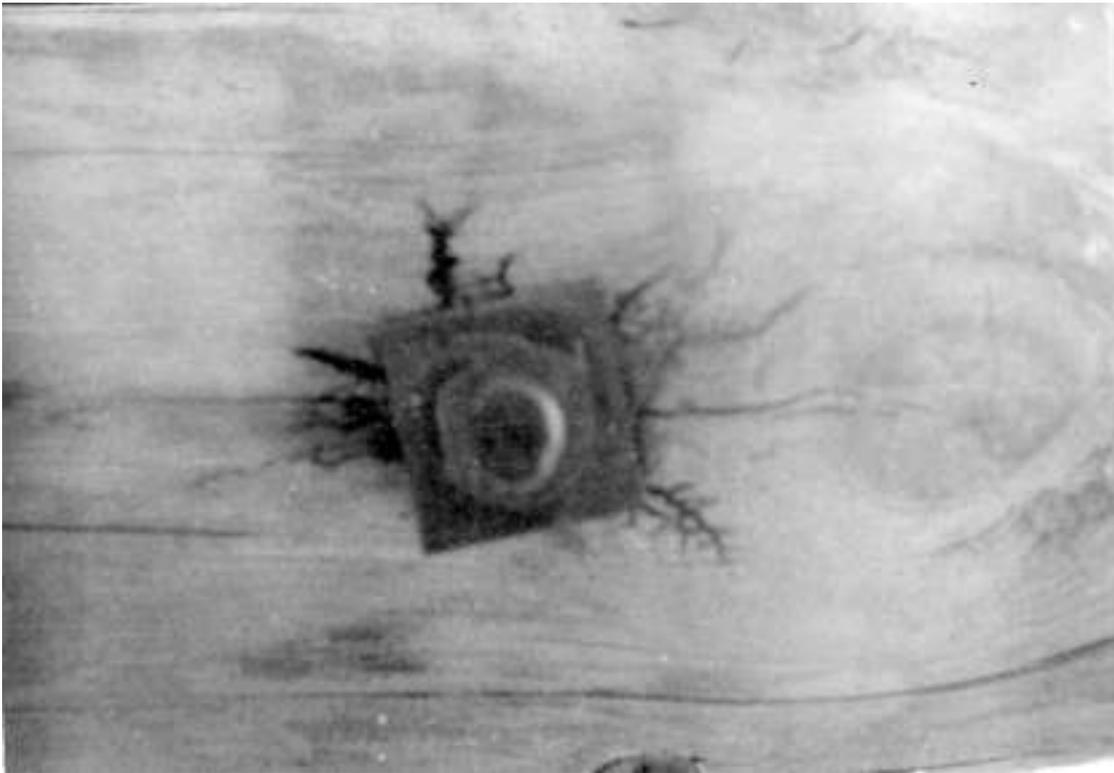
**Фото 16. Разрушение траверсы током утечки. Срок эксплуатации более 15 лет. Участок ВЛ Ажинияз - Рзд. 770 км. Траверса снята в 1988г.**



**Фото 17. Образование треков под траверсой у центрального болта крепления траверсы к опоре. Дефект № 1**



**Фото 18. Образование треков на стойке опоры между центральными болтами крепления траверс. Дефект № 2**



**Фото 19. Образование трещин в зоне центральных болтов крепления.  
Дефект № 3**



**Фото 20. Образование трещин в зоне крепления укосины к опоре. Де-  
фект № 4**



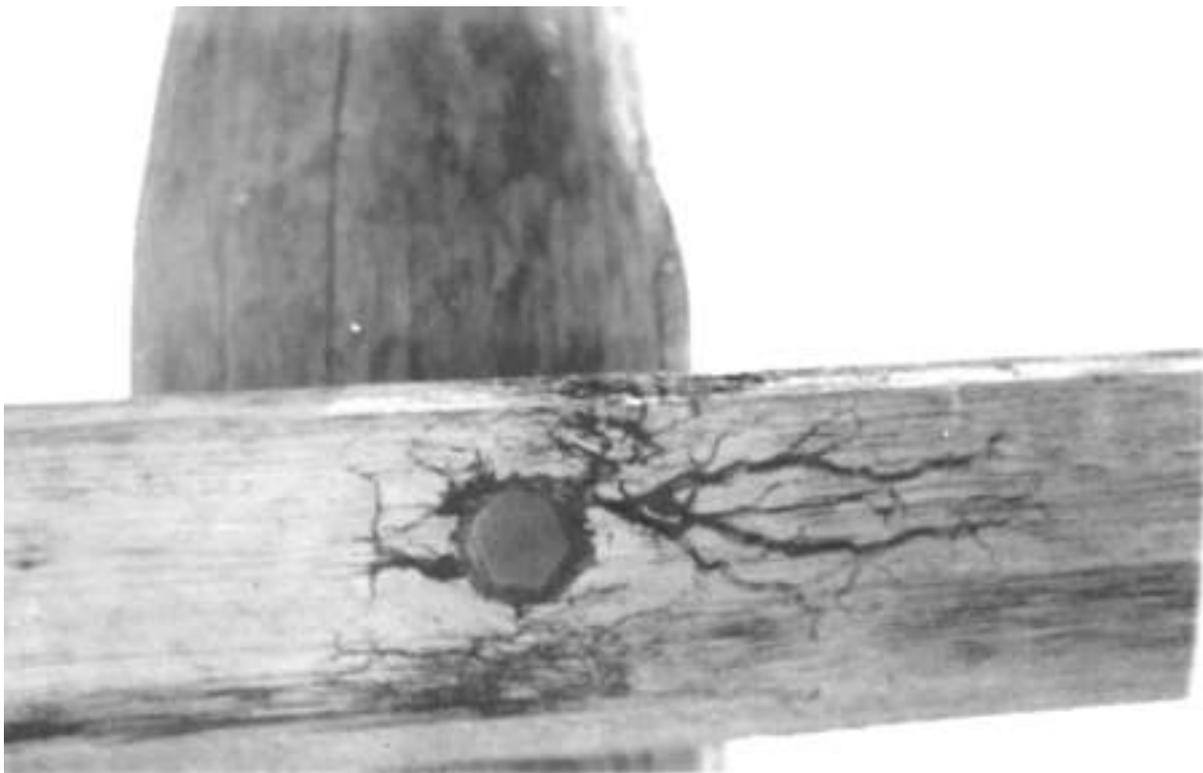
**Фото 21. Образование треков на поверхности траверсы под штырем. Дефект № 5**



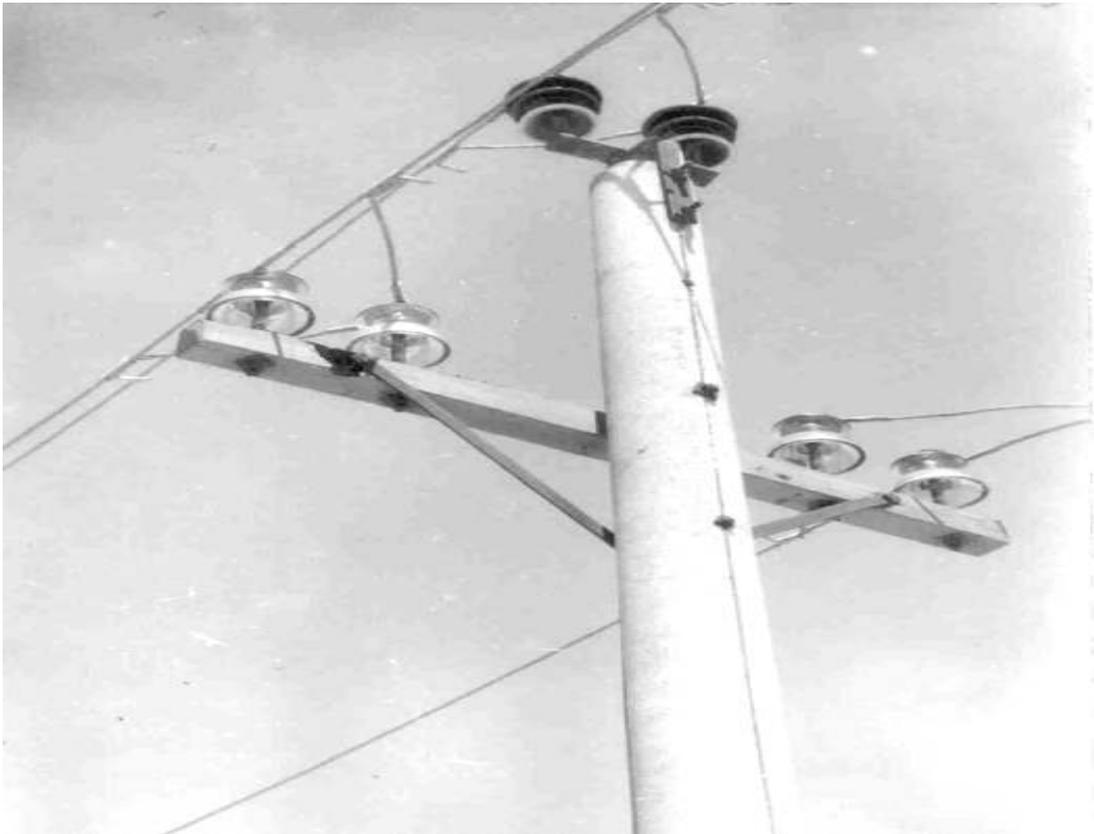
**Фото 22. Образование треков на боковой поверхности траверсы под укосиной и болтом крепления укосины. Дефект № 6. Срок эксплуатации более 15 лет. Глубина трека более 10 мм**



**Фото 23. Развитие трещин на боковой поверхности траверсы между металлическими элементами. Дефект № 7**



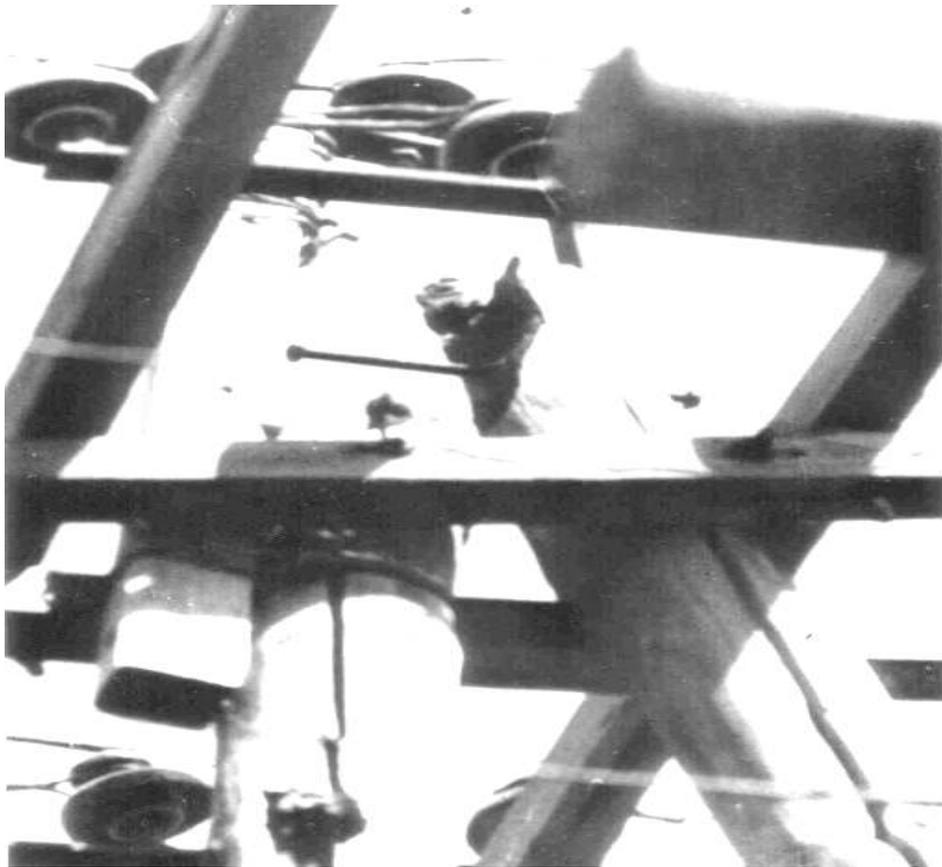
**Фото 24. Образование трещин на траверсе в зоне центрального болта крепления. Дефект № 8**



**Фото 25. Следы пожара на траверсе, находящейся в эксплуатации с 1986г. на участке Абадан – Рзд. 770 км. Дефект № 7**



**Фото 26. Следы пожара на траверсе, снятой в 1989 г. на участке Кун-ходжа - Рзд. 680 км. Срок эксплуатации 2 года. Дефект № 7**



**Фото 27. Пожар верхней части стойки А – образной опоры. Участок ВЛ 10 кВ, ст. Джамбай. Дефект №3**



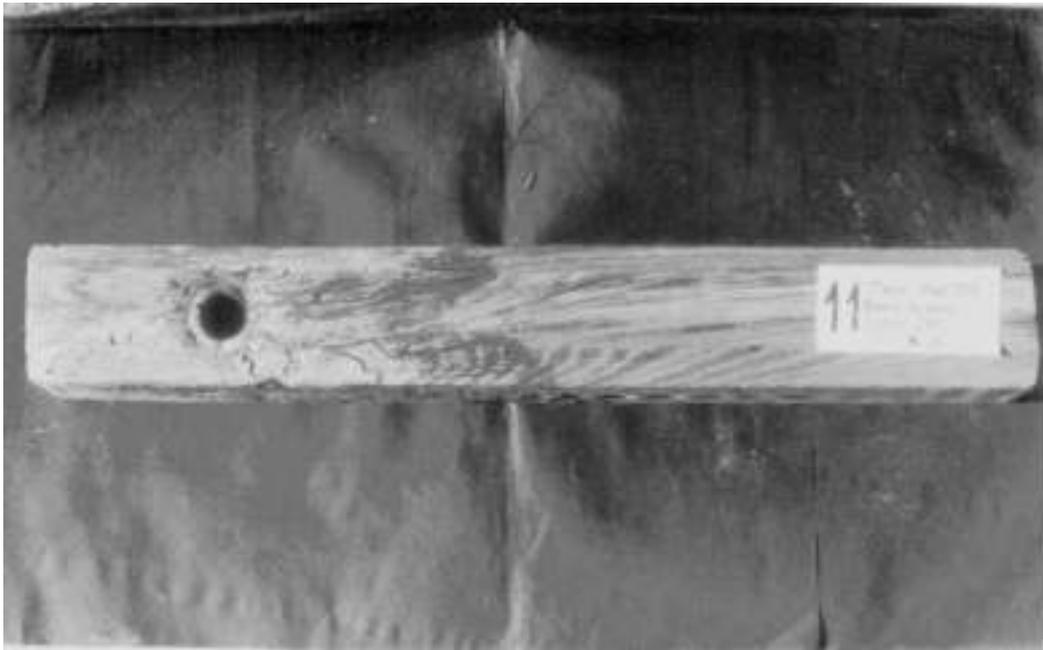
**Фото 28. Следы пожара на траверсе снятой в 1989 г. на участке ВЛ Кырк-Кыз - Рзд. 700 км. Срок эксплуатации 2 года. Дефект № 9**



**Фото 29. Последствия возгорания опоры двухцепной ВЛ 10 кВ от токов утечки на участке Айдин – Рзд. 121. Май 1991 г.**



**Фото 30. Следы разрушения древесины траверсы от токов утечки на участке двухцепной ВЛ 10 кВ. Рзд. 723 км – Ажинияз. 1990 г.**



**Фото 31. Интенсивность, образования треков под штырем и следы пожаров на траверсе. Траверса снята в 1988 г.**



**Фото 32. Многочисленные следы возникновения пожара на траверсе. Наибольшая глубина треков составляет 1,8 см. Снята в 1988г.**

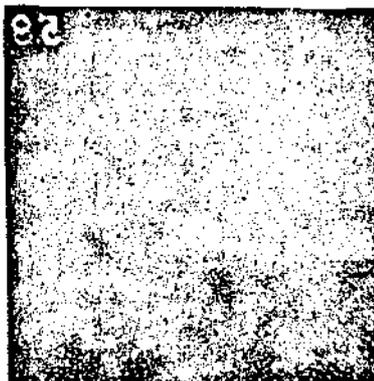


Фото 33. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы, сгоревшей после 2,5 лет эксплуатации. Увеличение К х800, длительность сигнала по элементу - 24 с

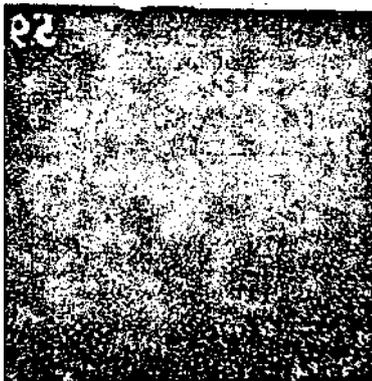


Фото 34. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы, сгоревшей после 2,5 лет эксплуатации. Увеличение Са х800, длительность сигнала по элементу - 8 с



Фото 35. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы, сгоревшей после 2,5 лет эксплуатации, Увеличение Fe X800, длительность сигнала по элементу - 48 с

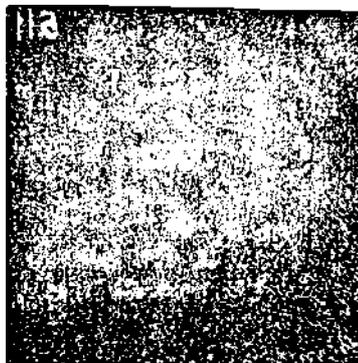
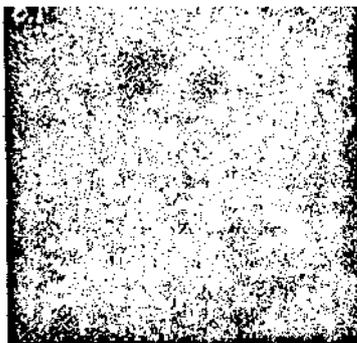
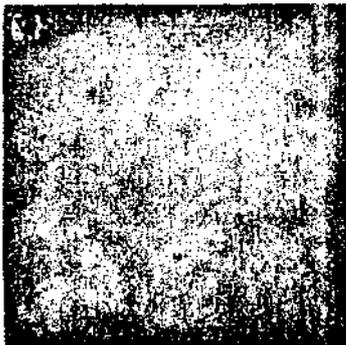


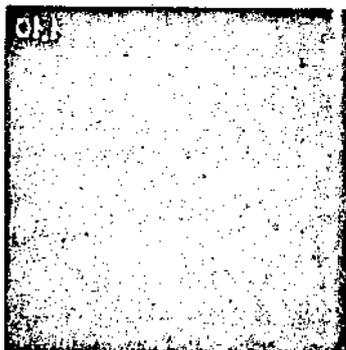
Фото 36. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы, сгоревшей после 2,5 лет эксплуатации. Увеличение Сг х800г длительность сигнала по элементу - 48 с



**Фото 37. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 5 лет эксплуатации. Увеличение К х800, длительность сигнала по элементу-24 с**



**Фото 38. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 5 лет эксплуатации. Увеличение Cl х800, длительность сигнала в элементе - 8 с**



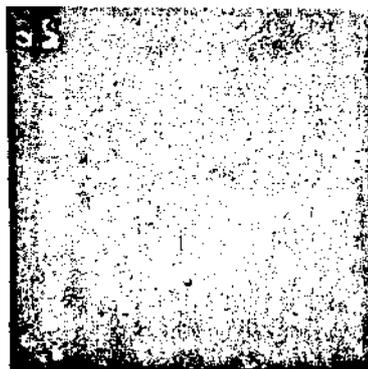
**Фото 39. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 5 лет эксплуатации. Увеличение Fe х800, длительность сигнала в элементе - 48 с**



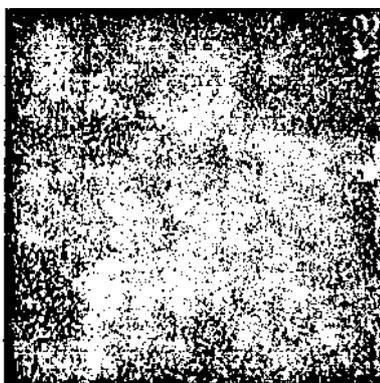
**Фото 40. Поверхность деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение х800**



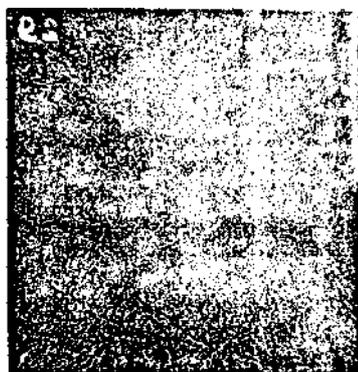
**Фото 41. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение Si x800, длительность сигнала в элементе - 8 с**



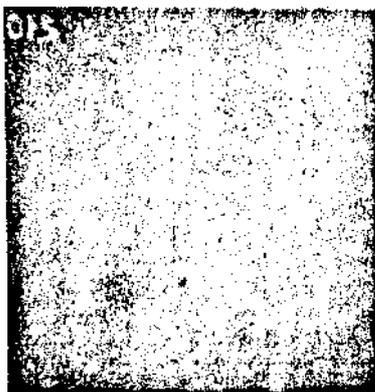
**Фото 42. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение S x800, длительность сигнала в элементе - 24 с**



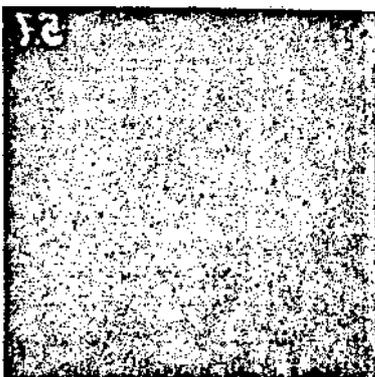
**Фото 43. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение K x800, длительность сигнала в элементе - 24 с**



**Фото 44. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение Ca x800, длительность сигнала в элементе - 8 с**



**Фото 45. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение Fe x800, длительность сигнала в элементе - 48 с**



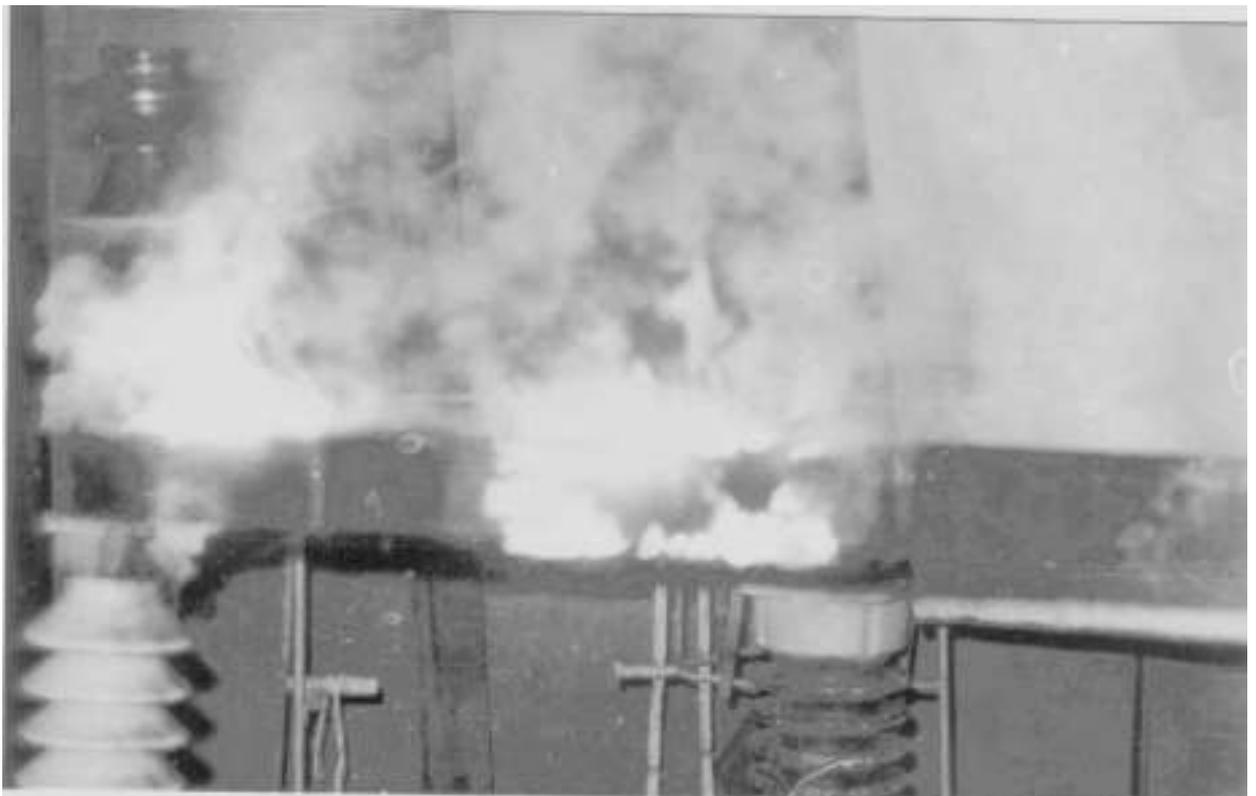
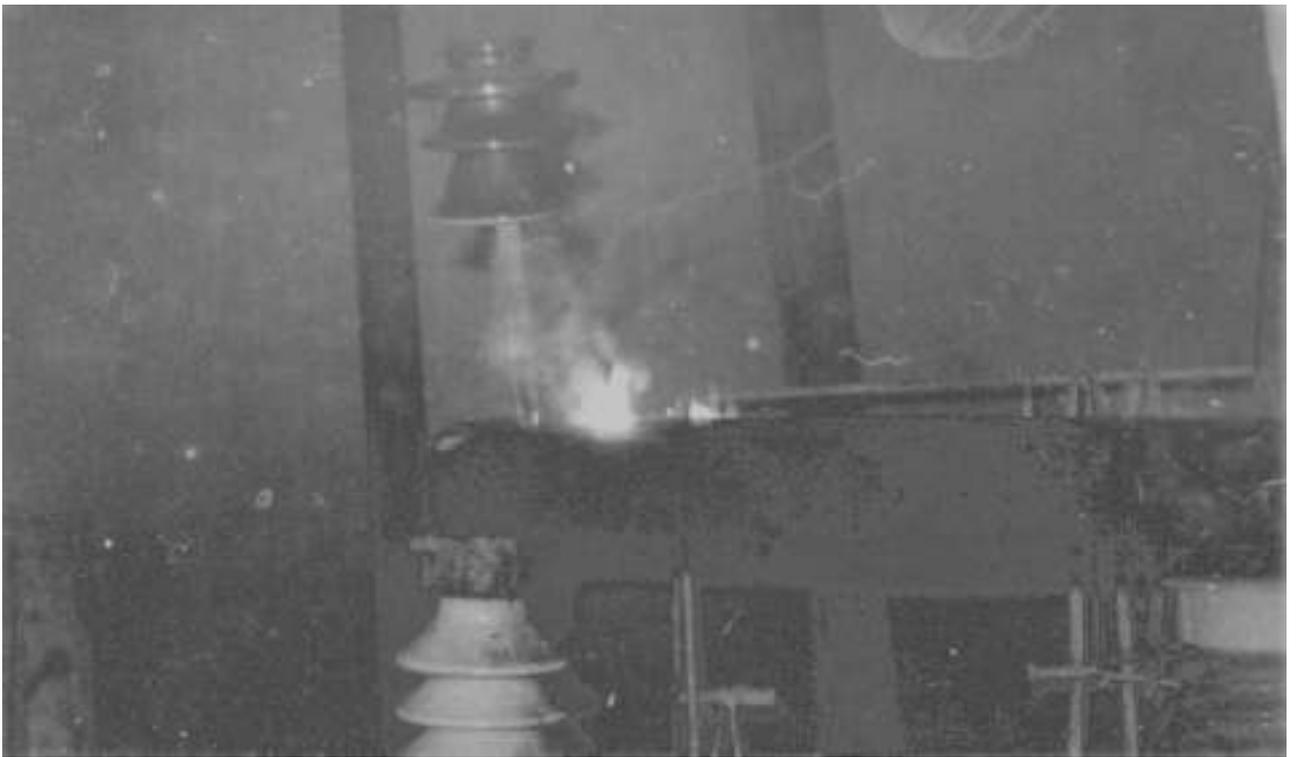
**Фото 46. Распределение пыли на поверхности деревянной траверсы после 10 лет эксплуатации. Увеличение Cl x800, длительность сигнала в элементе - 48 с**



**Фото 47. Поверхность деревянной траверсы после 15 лет эксплуатации. Увеличение x800**



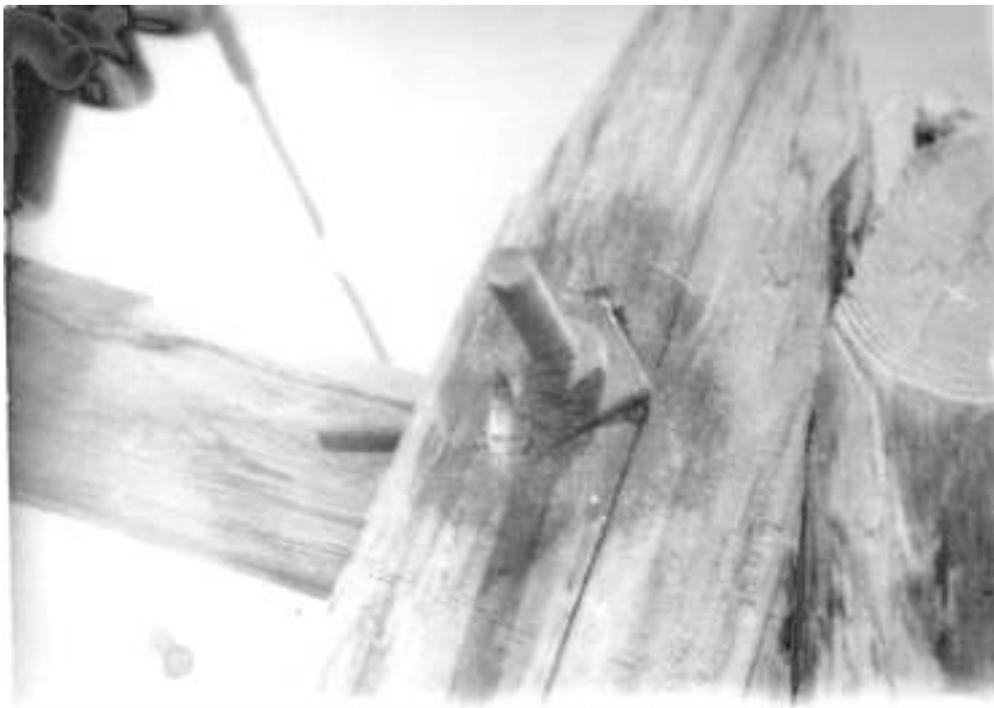
**Фото 48. Поверхность деревянной траверсы после 15 лет эксплуатации. Увеличение x1600**



**Фото 49. Возгорание траверсы в лабораторных условиях**



**Фото 50. Лабораторные исследования токовременных характеристик деревянных траверс длиной 2500 мм. Антисептик - КМ**



**Фото 51. Защита А - образной опоры эпоксидной смолой**



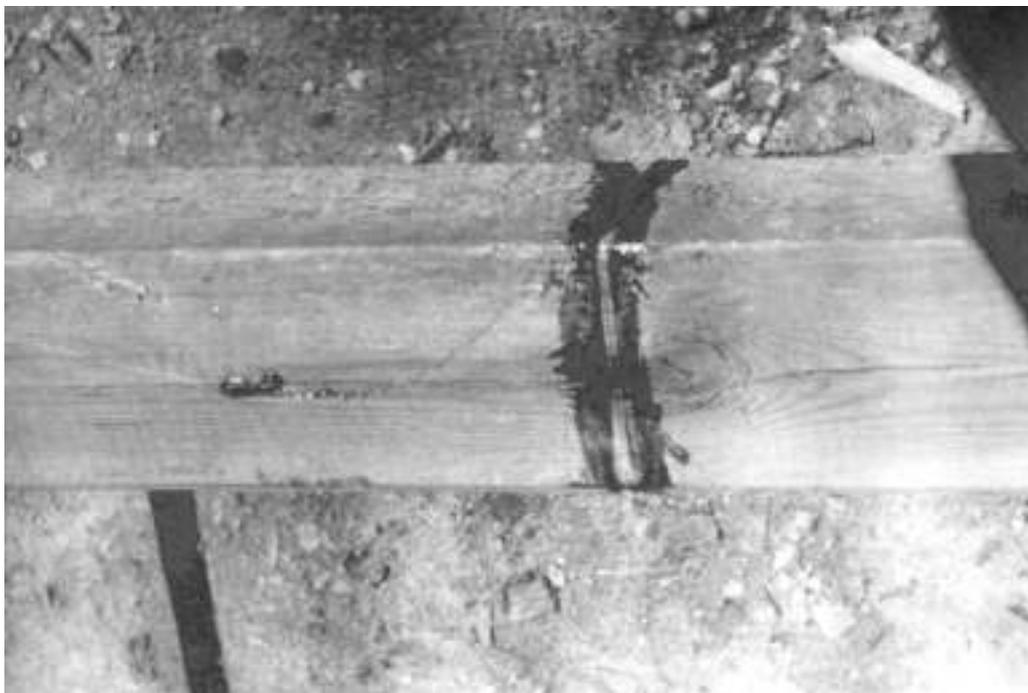
**Фото 52. Эпоксидная смола защищает зоны крепления траверсы к опоре**



**Фото 53. Защита поверхности опоры эпоксидной смолой в зоне центрального болта крепления траверсы к опоре**



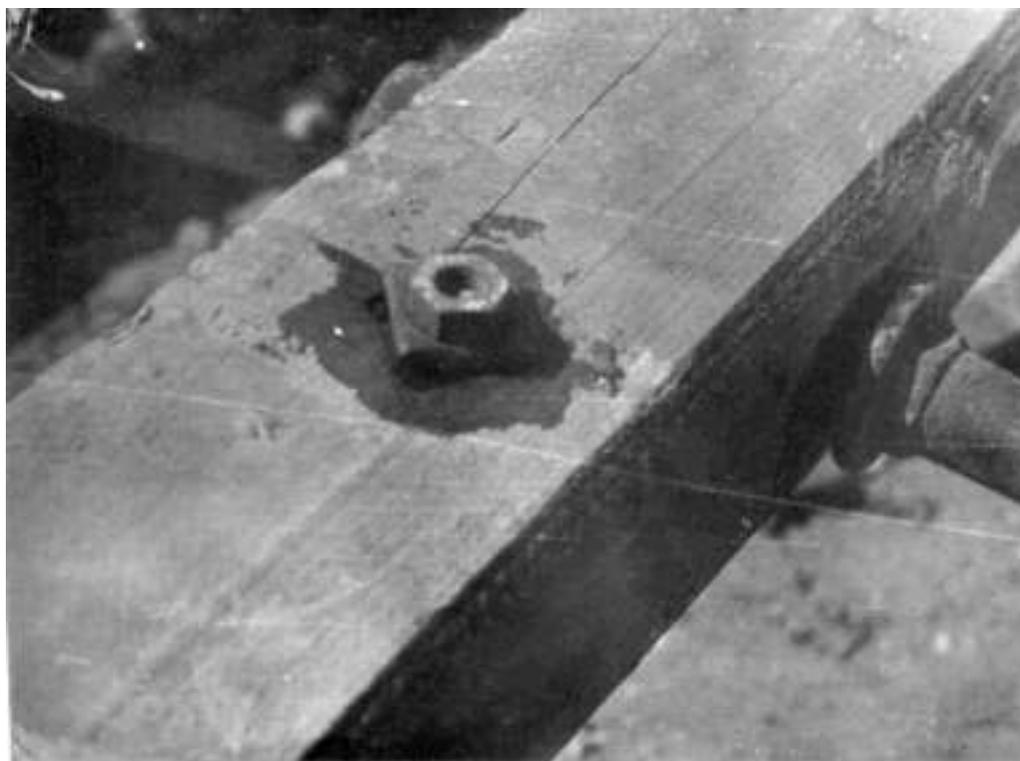
**Фото 54. Защита поверхности А – образной опоры эпоксидной смолой**



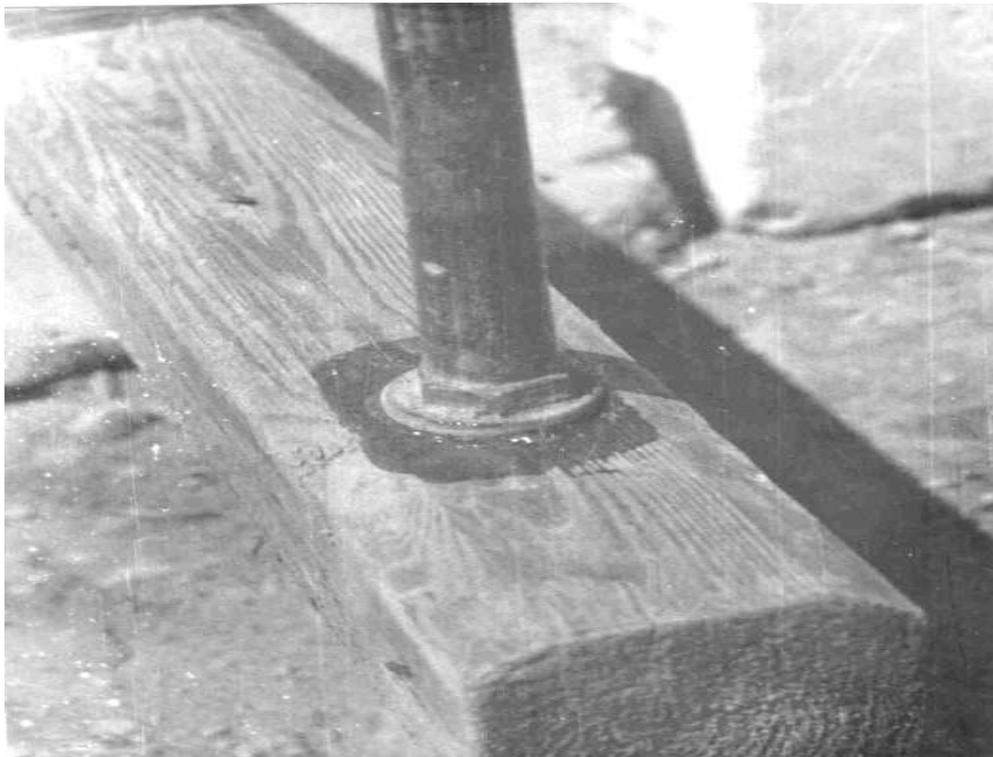
**Фото 55. Защита поверхности траверсы герметиком в зоне крепления укосины**



**Фото 56. Защита поверхности траверсы герметиком между штырем и укосиной**



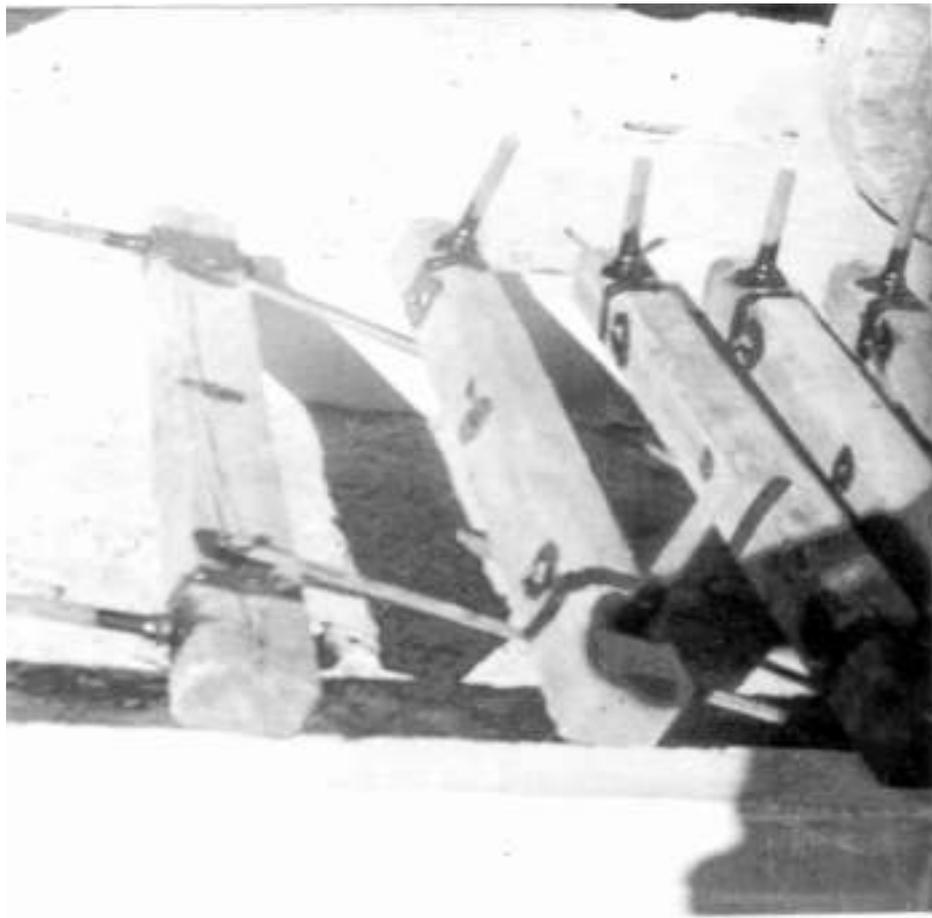
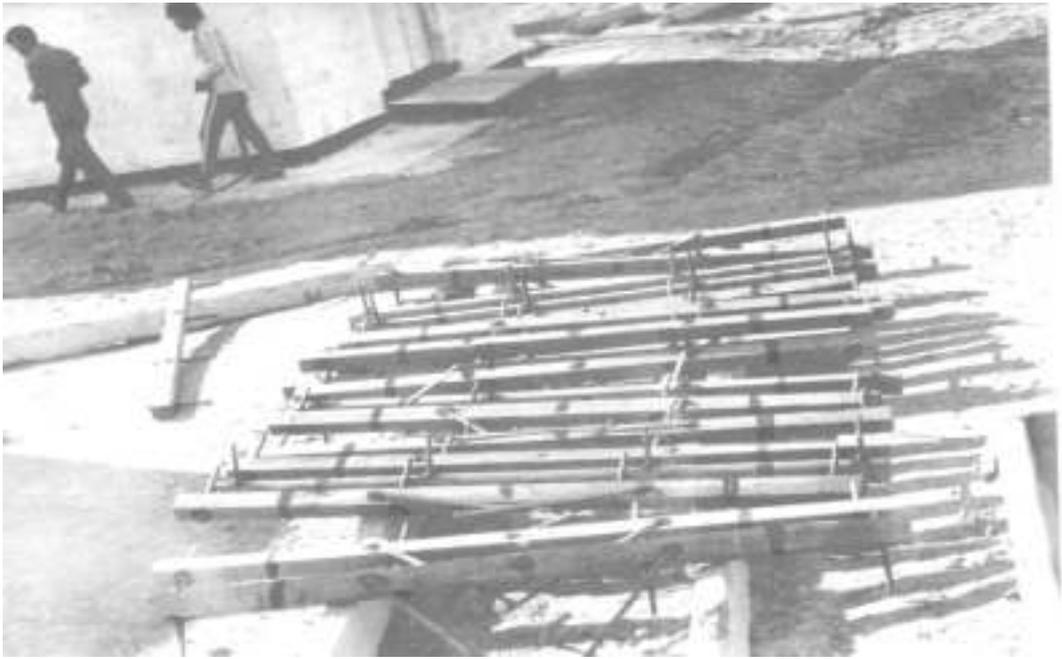
**Фото 57. Защитная обработка поверхности траверсы герметиком в зоне болта укосины**



**Фото 58. Защитная обработка поверхности траверсы герметиком в зоне штыря**



**Фото 59. Способы защиты траверсы эпоксидной смолой в зонах крепления штыря к укосине**



**Фото 60. Траверсы, обработанные защитным составом герметика и подготовленные к установке на ВЛ**

План 2006 г.

Научное издание

**Н.А. ШЕРГУНОВА**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Подписано в печать 7.08.2006 г. Формат 60x90 1/16.  
Бумага писчая. Печать оперативная. Усл. печ. л. 13,5.  
Тираж 3000. Заказ №

Отпечатано в ГОУВПО Самарский государственный технический университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244