

Пак Владимир Моисеевич

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ  
КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург  
2002 г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ)

Научный консультант: д.т.н., проф. Полонский Ю.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Брынских Е.А.  
д.т.н., проф. Волокобинский Ю.М.  
д.ф.-м.н. Хатипов С.А.

Ведущая организация: АО «Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики» РАО «ЕЭС» (г. Москва)

Защита состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2002 г. в \_\_\_ часов в аудитории 325 (Главное здание) на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет Д 212.229.16.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н., доцент

Журавлева Н.М.

**Актуальность проблемы.** Прогресс в электромашиностроении, в том числе и электрических машин, определяется качественным уровнем электроизоляционных материалов, которые по сравнению с магнитными и проводниковыми имеют наибольшие резервы для совершенствования. Эффективность новых электроизоляционных материалов реализуется, главным образом, через системы изоляции электрооборудования. Они в значительной мере определяют эксплуатационные, энергетические характеристики, долговечность и надежность электрических машин.

Повышение уровня свойств систем изоляции и нагревостойкости позволяет увеличить электрические, физико-механические и тепловые нагрузки на изоляцию, т.е. повысить удельные характеристики электрических машин или увеличить срок их службы. В итоге достигается относительное сокращение расхода электротехнической стали, черных и цветных металлов, обмоточной меди на единицу мощности электрооборудования. За счет снижения толщины изоляции на 15-20% мощность электрических машин может быть повышена в тех же габаритах на 4-10%, что соответствует снижению расхода черных и цветных металлов при их производстве на 3-8%. Повышение допустимого перегрева обмоток на 20°С позволяет увеличить мощность электрических машин на 13-15%, т.е. на 10-12% снизить их материалоемкость. От качества электроизоляционных материалов во многом зависит степень механизации и автоматизации обмоточно-изолирующих работ, длительность технологического цикла изготовления изоляции. Особенно актуальной проблема повышения надежности изоляции связана с развитием в последние годы потребности в турбогенераторах с воздушным охлаждением.

Поэтому для создания новых электроизоляционных материалов, способных удовлетворять повышенным требованиям электромашиностроения, требуется высокий уровень экспериментальных и теоретических исследований широкого класса полимерных материалов, основанный на изучении физико-химических, диэлектрических, электрофизических и физико-механических свойств диэлектриков.

**Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР:**

- Федеральная целевая программа «Энергосберегающая электротехника» (Постановление Правительства РФ №341 от 23.03.1996 г.).
- «Освоение новых технологических процессов изготовления терморезистивной изоляции стержневых обмоток турбо-, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов», шифр: ТО1.1793Т (1981-1983 г.г.).
- «Усовершенствование технологических процессов изготовления комплекса электроизоляционных материалов для терморезистивной изоляции турбо-, гидрогенераторов», шифр ТО184066-ЗИ79 (1984-1986 г.г.).
- «Разработка технологии изготовления терморезистивной изоляции обмоток статора турбо-, гидрогенератора из лент на основе слюдяных бумаг новой структуры», хоздоговоры №153-89/55 и №407( 1989-1991 г.г.).
- Программа развития производства электроизоляционных материалов и пропиточных составов на период с 2000-2003 г.г. ОАО «Холдинговая компания Элинар».

**Цель работы.** Создание и внедрение электроизоляционных предварительно пропитанных слюдяных лент для систем высоковольтной изоляции турбо-, гидрогенераторов и электродвигателей с высокими значениями по электрофизическим, физико-механическим свойствами и нагревостойкости.

В соответствии с этой целью в работе ставятся и решаются следующие задачи:

- модифицировать эпоксиполиэфирную смолу реакционноспособными добавками с целью повышения эластичности;
- разработать режимы термопрессования изоляции стержней и катушек на модифицированном эпоксиполиэфирном связующем;
- оценить электрофизические, физико-механические свойства и нагревостойкость новой системы изоляции путем проведения сравнительных функциональных испытаний с базовой изоляцией на макетах и натуральных изделиях при воздействии электрических, механических и тепловых нагрузок;
- исследовать химическую и надмолекулярную структуру, диэлектрические свойства пленки полиэтилентерефталата с целью использования в составе композиционного слюдяного материала для повышения электрической прочности изоляции;
- теоретически и экспериментально обосновать эффект повышения электрической прочности изоляции на основе композиционного слюдяного материала, содержащий пленку полиэтилентерефталата;
- внедрить разработанную термореактивную систему изоляции на электромашиностроительных заводах.

**Научная новизна:**

- впервые показано, что инжекция электронов из катода в поверхностные слои пленки полиэтилентерефталата, и их локализация на ловушках наблюдаются даже в отсутствие частичных разрядов, а образование в поверхностном слое полимера областей с аномально высоким значением локального электрического поля связано с присутствием в его объеме кристаллической фазы;
- впервые дано теоретическое обоснование повышения длительной электрической прочности композиционного слюдяного материала при включении в его состав пленки полиэтилентерефталата. Данный механизм был подтвержден результатами сравнительных испытаний по электрическому пробоему композиционных материалов без пленки и содержащих пленку на плоских образцах и натуральных изделиях;
- методами проводимости и термостимулированной деполяризации показано, что в отвержденном эпоксиполиэфирном связующем существуют микродефекты, приводящие к развитию в его объеме в электрических полях, превышающих  $10^5$  В/м, разрядных процессов;
- обработка экспериментальных результатов по пробоему композиционного материала, не содержащего пленку, трёхпараметрическим распределением Вейбулла подтвердила данные результаты, указав на наличие не нулевой вероятности мгновенного пробоя композита.

**Практическая значимость.** Полученные в работе научные результаты позволили:

- разработать и внедрить в серийное производство новые пропитанные слюдяные ленты для современных изоляционных систем турбо-, гидрогенераторов с утоненной изоляцией с высокими диэлектрическими, физико-механическими свойствами и нагревостойкостью;
- разработать и внедрить новую современную изоляционную систему для высоковольтных электродвигателей с высокими диэлектрическими, физико-механическими свойствами и нагревостойкостью;
- разработать и внедрить в серийное производство предварительно пропитанные и непропитанные слюдяные ленты с подложкой из пленки полиэтилентерефталата,

обеспечивающие высокие значения кратковременной и длительной электрической прочности изоляции электрических машин.

**На защиту выносятся:**

- термореактивная система изоляции крупных электрических машин на основе предварительно пропитанной модифицированным эпоксиноволачным связующим ленты. Сравнительные функциональные испытания, проведенные на стержнях макетах и натуральных изделиях показали, что новая система изоляции Монотерм по электрическим, физико-механическим свойствам и нагревостойкости превосходит базовую изоляцию Слюдотерм. Подбор соотношения компонентов в модифицированном эпоксиноволачном связующем позволил оптимизировать процесс отверждения связующего в ленте в соответствии с требованиями для термогидростатической опрессовки изоляции, а также сократить цикл ее термопрессования по сравнению с базовой изоляцией Слюдотерм;
- термореактивная система изоляции высоковольтных электродвигателей, изготавливаемая термогидростатической опрессовкой и вакуум-нагнетательной пропиткой с использованием пропитанных и непропитанных лент, содержащих пленку полиэтилентерефталата;
- теоретическое и экспериментальное обоснование эффекта повышения электрической прочности изоляции на композиционных слюдяных лентах, содержащих пленку полиэтилентерефталата. Показано, что включение пленки полиэтилентерефталата в композиционный материал, в объеме которого, из-за присутствия микродефектов в виде полостей, в электрическом поле возможно развитие объемно-зарядовых процессов, приводит к значительному увеличению времени до пробоя изоляции и начального времени, в течение которого вероятность пробоя равна нулю.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением физико-химических, диэлектрических, термоактивационных и электрофизических методов исследования свойств диэлектриков, подтверждается сравнительными функциональными испытаниями нового и базового образцов изоляции, совпадением теоретической модели с экспериментальными результатами испытаний изоляции на макетах и натуральных изделиях.

**Личный вклад автора** является основным на всех стадиях исследования. Все приведенные в работе теоретические и экспериментальные результаты получены автором или при его непосредственном участии, или под его руководством. На всех этапах работы автором формулировались основные направления исследований и обобщались полученные результаты с использованием современных достижений в области физики диэлектриков, электроизоляционных материалов и электрической изоляции.

Совокупность результатов выполненных исследований и испытаний можно квалифицировать как новое научно обоснованное техническое решение – **«Разработка научно-технических основ создания и выбора электроизоляционных материалов для термореактивной изоляции крупных электрических машин»**, внедрение которого вносит значительный вклад в развитие электроизоляционной техники и электроэнергетики.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на:

I Международной конференции по электромеханике и электротехнологии, 13-16 сентября 1994г., Суздаль; II Международной конференции по электромеханике и электротехнологии, 1-5 октября 1996г., Крым; II Международной конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава», 4-6 июня 1997г., Новочеркасск; II Международной конференции

«Физико-технические проблемы электротехнических материалов, 1-4 декабря 1997г.; Международной научно-технической конференции «Изоляция -99», 15-18 июня 1999 г., Санкт-Петербург; Всероссийском электротехническом конгрессе с Международным участием «ВЭЛК-99», 28 июня-3 июля Москва, 1999 г.; VI симпозиуме «Электротехника 2010», 22-26 октября, Москва, 2001 г.; III симпозиуме «Электрические машины в новом столетии», 9-12 октября, Москва, 2000 г.; Девятой международной конференции «Физика диэлектриков», 17-22 сентября, Санкт-Петербург, 2000г.; Conference record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2-5 April, 2000, Anaheim, California, USA; IV Международной конференции «Физико-технические проблемы электротехнических материалов и компонентов», 24-27 сентября, Клязьма, 2001 г.; Electrical Insulation Conference 2001, October 15-18, Cincinnati, Ohio, USA; I Всероссийской конференции по прикладной химии высоких энергий, Москва, ноябрь, 2001 г.; Conference record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 7-10 April, 2002, Boston, Massachusetts, USA; 3 Международной научно-технической конференции «Изоляция -2002», 15-18 июня, Санкт-Петербург, 2002 г.; The International Electrical Insulation Conference «INSUCON-2002», Berlin, Germany, 18-20 June 2002.

**Публикации.** Результаты, положенные в основу диссертации, опубликованы в 53 работах.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы, включающего 275 наименований и приложений. В работе 301 страница, в том числе 121 рисунок и 67 таблиц на 82 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

Во введении дано обоснование актуальности диссертационной работы.

### **Глава1. Современные тенденции развития электроизоляционных материалов.**

Анализ систем изоляции крупнейших мировых электротехнических компаний, выпускающих турбо-, гидрогенераторы и высоковольтные электродвигатели, показывает, что в отечественных системах изоляции содержание слюдяного барьера составляет 35-40%, а в зарубежных – группа АВВ, Альстом, Сименс – 50-60%. Благодаря использованию слюдяных лент с повышенным содержанием слюды зарубежным компаниям удалось снизить толщину изоляции и повысить значение средней напряженности электрического поля – основного конструктивного показателя электрической машины – до 2,7-2,85 МВ/м. Причиной такого отставания от зарубежных компаний является отсутствие в России производства утолщенных слюдяных бумаг.

В отечественных системах изоляции крупных электрических машин практически не используются термостойкие высокомолекулярные эпоксиноволачные и циклоалимфатические эпоксидные смолы. Наиболее широко применяемые в настоящее время системы изоляции Слюдотерм на пропитанной эпоксифенольным связующим слюдяной ленте ЛТСС-3М и ВЭС-2 на ленте ЛСК-110, пропитанной компаундом на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-16, относятся к классу нагревостойкости В (130° С). Фактически до внедрения новых пропитанных лент на эпоксиноволачном связующем в России отсутствовала изоляция класса нагревостойкости F (155° С) для крупных электрических машин.

Новые системы изоляции должны быть рассчитаны на повышенную длительную электрическую прочность, что позволило бы спроектировать электрические машины на более

высокие рабочие напряженности электрического поля в изоляции. При этом необходимо сохранить остальные свойства исходной системы, такие, как срок службы и механическую прочность. Имеются положительные данные о работе системы изоляции на основе слюдяной бумаги и пленочной подложки по менее крупным машинам. Слюдобумажная лента, состоящая из слюдяной бумаги и подложки из пленки полиэтилентерефталата, является перспективной и для усовершенствования систем изоляции более мощных электрических машин.

Основываясь на проведенном анализе изоляционных систем крупных электрических машин, в постановке задачи главы 1 сформулированы основные научные и научно-прикладные задачи, решению которых посвящена данная диссертационная работа.

## **Глава 2. Разработка предварительно пропитанной ленты и исследование режимов термопрессования изоляции.**

В качестве связующего для новой пропитанной ленты выбрана эпоксиноволачная смола УП-643 или DEN-438. Для придания эластичности связующему эпоксиноволачная смола модифицирована реакционноспособными добавками. Для отверждения связующего используется отвердитель латентного типа – комплекс трехфтористого бора с амином. Количество активной добавки и отвердителя выбрано на основе температурной зависимости диэлектрических свойств ( $\rho_v$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $E_{пр}$ ) на образцах стеклоткани, пропитанной эпоксиноволачным лаком и термообработанной по соответствующему режиму. Изучение кинетики отверждения связующего в пропитанной ленте методом дифференциально-термического анализа позволило выбрать рецептуру эпоксиноволачного связующего и температурно-временные режимы отверждения в соответствии с требованиями для гидростатического термопрессования изоляции. На основе модифицированного эпоксиноволачного связующего разработаны и внедрены две марки пропитанных лент: Элмикатерм 55409 со стеклоподложкой и лента ЛСМ, содержащая дополнительно подложку из пленки полиэтилентерефталата электротехнического назначения марки ПЭТ-Э. В ленте Элмикатерм 55409 используется слюдяная бумага массой 85-160 г/м<sup>2</sup>, обеспечивающая значение слюды в системе изоляции 45-55%, что существенно выше, чем в базовой изоляции Слюдотерм (30-35%). Методом измерения полных токов проводимости на образцах изоляции на ленте Элмикатерм 55409 определены начальные стадии реакции отверждения и степень отверждения (рис.1), которые были использованы при отработке режимов начальной и конечной стадии термогидростатической опрессовки изоляции в битумном автоклаве. Видно, что после начала интенсивного отверждения (максимум  $K_{пр}$ ) довольно высокая скорость отверждения наблюдается в течение 3 ч и полное отверждение – 8 ч. Отработка режимов прессования проводилась на оборудовании АО «Электросила», а в качестве критериев оценки качества изоляции служили характеристики амплитуды импульсов частичных разрядов (ЧР) и длительная электрическая прочность (ДЭП) пазовых частей и зон углов стержней турбо-, гидрогенераторов. Наиболее высокая монолитность изоляции получается при гидростатическом способе опрессовки (рис.2). Изоляции на лентах Элмикатерм 55409 и ЛСМ при внедрении присвоено наименование Монотерм.

## **Глава 3. Физико-химические и диэлектрические исследования пленки полиэтилентерефталата.**

Полимерные пленки, в том числе и двухосноориентированная пленка полиэтилентерефталата (ПЭТ-Э), характеризуются низкими значениями поверхностной энергии и адгезией к другим материалам.

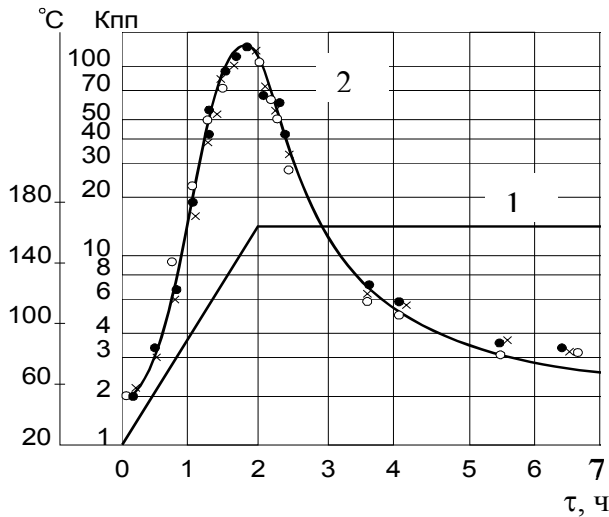


Рис. 1 Кривая послыйного отверждения изоляции толщиной 1 мм стержневой макетов на ленте Элмикатерм 55409: 1 – изменение температуры, 2 – изменение Кпп: о - внутренний слой, × - средний слой. • - внешний слой.

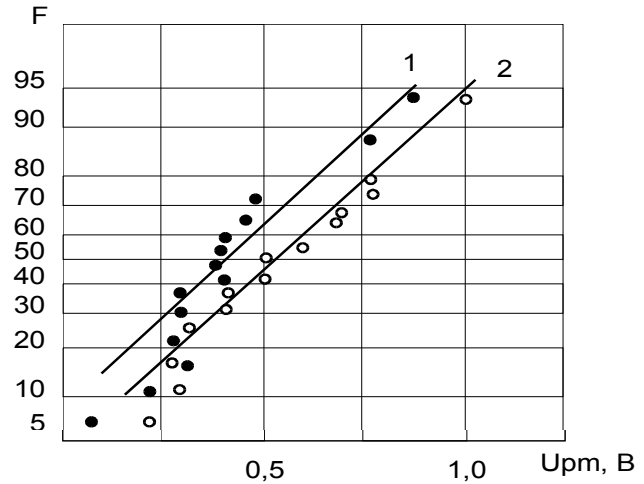


Рис.2 Нормальное распределение амплитуды импульсов ЧР в изоляции стержневой гидрогенератора СВ-1470/149-104У4 (гидростатическая опрессовка без предварительной подпрессовки) Монотерм: 1 – Uисп=10 кВ, 2 – Uисп=25 кВ

Это вызывает проблемы при их использовании в составе многослойных изоляционных материалов. Модификация поверхности пленки ПЭТ-Э с целью существенного улучшения адгезионных свойств достигалась путем обработки на установке с использованием тлеющего низкочастотного (50Гц) разряда. Модификация пленки ПЭТ-Э в катодном падении тлеющего разряда при изменении величины тока разряда от 20 до 100 мА и времени обработки от 10 до 60 с сопровождалась значительным снижением краевого угла смачивания по воде от  $68^\circ$  до почти полного растекания. В то же время в поверхностных слоях пленки происходило образование отрицательного поверхностного заряда, величина которого возрастала до  $22 \text{ нКл/см}^2$  с ростом времени обработки и тока разряда. Все данные по углу смачивания и поверхностному заряду, полученные для пленки ПЭТ-Э после обработки образцов в различных условиях тлеющего разряда и после хранения на воздухе, были сведены на одну координатную плоскость (рис.3). Полученные результаты свидетельствуют о том, что между величинами краевого угла смачивания и плотности поверхностного заряда существует корреляция. Таким образом, модификация поверхностных свойств пленки ПЭТ-Э в тлеющем низкочастотном разряде связана с образованием избыточного заряда в поверхностных слоях полимера. Исследования химической и надмолекулярной структуры пленок ПЭТ-Э Владимирского химзавода и Майлар А фирмы Дюпон показали, что оба полимера имеют одинаковое химическое строение. Степень кристалличности для ПЭТ-Э составляет 36%, а Майлар А – 34%.

Исследования диэлектрических свойств исходной и модифицированной в тлеющем НЧ-разряде и в разряде постоянного тока пленки ПЭТ-Э в интервалах частот от 100Гц до 3МГц и температур 20-200°C показали, что на кривых  $\text{tg}\delta-T$  имеется максимум диэлектрических потерь (связанный с  $T_c$  полимера), положение которого изменяется от 120 до 150°C с увеличением частоты электрического поля. В области выше 500кГц появляется второй низкотемпературный максимум, положение которого меняется от 50°C до 80°C с ростом частоты. Следовательно, диэлектрические потери обусловлены подвижностью боковых групп (низкотемпературный



максимум,  $\beta$ -процесс) и сегментов цепей макромолекул (высокотемпературный максимум,  $\alpha$ -процесс). Энергия активации  $\alpha$ -процесса составляет 3,52 эВ, а  $\beta$ -процесса – 0,6 эВ.

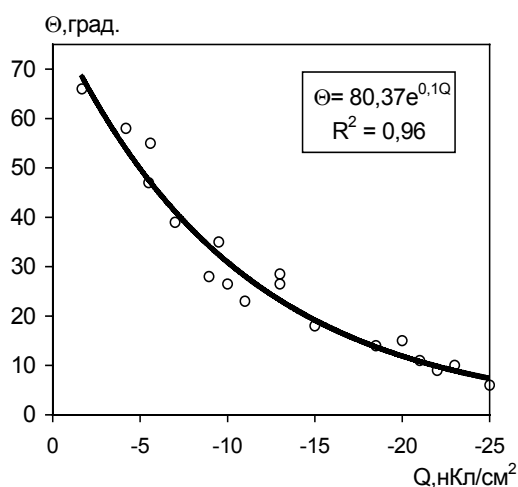


Рис.3. Зависимость краевого угла смачивания плёнки ПЭТ-Э от плотности поверхностного заряда

Установлено, что модификация пленки в НЧ-разряде и в разряде постоянного тока не влияет на температурную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в широком интервале частот.

На кривых  $\epsilon$ -T наблюдалось резкое возрастание  $\epsilon$  в диапазоне от 100°C до 150°C, связанное с размораживанием сегментальной подвижности, а при дальнейшем увеличении температуры зависимость выходила на плато.

Модификация пленки в тлеющем НЧ-разряде и в разряде постоянного тока вызывала рост  $\epsilon$ , особенно заметный в диапазоне от 100°C до 150°C. Тот факт, что воздействие разряда не влияет на  $\text{tg}\delta$ , т.е. не вызывает изменений в релаксационных процессах, связанных с подвижностью участков макромолекул, свидетельствует о том, что наблюдаемый рост  $\epsilon$  не связан с процессами релаксации полярных фрагментов макромолекул. Как было отмечено, модификация пленки ПЭТ-Э в разряде приводит к образованию в ней избыточного отрицательного заряда. Накопление заряда в поверхностных слоях полимера обусловлено локализацией на структурных ловушках электронов, инжектированных из плазмы разряда. Наблюдаемое увеличение  $\epsilon$  связано с прыжками электронов по соседним локализованным состояниям. С ростом температуры частота прыжков таких электронов существенно увеличивается и приводит к росту  $\epsilon$ . Исследования  $\text{tg}\delta$  и  $\epsilon$  показали, что модификация пленки в разряде не ухудшает  $\text{tg}\delta$  в широком интервале температур и частот, а увеличение  $\epsilon$  наблюдалось лишь при высоких частотах и повышенных температурах.

**Глава 4. Исследование объемно-зарядовых процессов, протекающих в композиционном материале и его компонентах под действием электрического поля.** Главы 4 и 5 посвящены экспериментальному и теоретическому обоснованию эффекта повышения электрической прочности слюдяной изоляции, содержащей пленку ПЭТ-Э. Исследователи, изучившие пробой газов, столкнулись с очень интересным барьерным эффектом; когда помещение в газовый промежуток тонкого слоя диэлектрика с низким пробивным напряжением (например, бумаги или картона) резко повышает электрическую прочность самого газового промежутка между двумя электродами. Причиной такого странного явления считали нарушение процесса образования электронных лавин в газовом зазоре, влияние барьера на распределение объемных зарядов и электрических полей в газовом зазоре (Сканави Г.И. «Физика диэлектриков» (область сильных полей).-1958.-М.:ГИФМЛ.-907с). Полагают, что причиной разрушения полимеров в электрическом поле является воздействие на них ЧР. Однако, изучение закономерностей электрического старения полимеров при подавлении ЧР показывает, что существенную роль в процессе пробоя в полимере и, вероятно, электрического старения, играет объемный заряд, возникающий в полимере за счет инжекции электронов из электродов и закрепление их на ловушках. Вероятно, пленка ПЭТ-Э в слюдяной изоляции играет роль такого барьера, несмотря на

низкую стойкость к воздействию ЧР и малое время до пробоя по сравнению со слюдяной изоляцией. Действительно, на основании исследований зарядовых состояний в композиционном слюдяном материале были получены экспериментальные результаты, доказывающие эффект электрического упрочнения изоляции в присутствии пленки ПЭТ-Э. Процессы образования и перераспределения зарядов в композиционном материале и в его компонентах: слюдяной бумаге и стеклоткани, пропитанных модифицированным эпоксисилоачным связующим, и пленке ПЭТ-Э изучали методами термостимулированной релаксации (ТСР) гомозаряда и термостимулированной деполяризации (ТСД). Плоские образцы композиционного материала готовили термопрессованием при  $R_{уд}=1,5$  МПа, температуре  $150^{\circ}\text{C}$  в течение 8 ч. По существу, образцы представляли собой элемент изоляции электрической машины.

Для измерения токов ТСР гомозаряда образцы предварительно заряжали в тлеющем разряде. Зарядку образцов проводили в разряде постоянного тока при токе 50мА, времени обработки 180 с и давлении воздуха 13,3Па. Затем образцы помещали между двумя прижимными электродами. Измерение токов ТСР проводилось в условиях линейного нагрева от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $180^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $4^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Для изучения процессов, приводящих к образованию объемного заряда в пленке, были проведены эксперименты по межэлектродной поляризации пленки при температуре от  $30^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$  в постоянном электрическом поле  $10^7$  В/м. Для исключения ЧР на обе поверхности образца наносились алюминиевые электроды методом вакуумного термического распыления металла. Затем образцы нагревали до температуры поляризации от  $30^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$  и поляризовали во внешнем электрическом поле  $10^7$  В/см в течение от 20 мин до 420 мин. После охлаждения во внешнем электрическом поле с той же скоростью до  $20^{\circ}\text{C}$ , выключали поле и проводили измерение токов ТСД при тех же условиях нагрева, что и токи ТСР. Проводимость образцов измеряли в режиме медленного нагрева ( $0,2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) в постоянном поле напряженностью  $10^5$  В/м.

При сравнении термограмм токов ТСР и ТСД исходной и модифицированной в НЧ-разряде пленки установлено следующее. Исходная пленка ПЭТ-Э характеризуется малыми по величине токами ТСР (рис.4 А, кривая 1). Нагрев модифицированной в НЧ-разряде пленки приводит к объемному перераспределению электронов, инжектированных из разряда, и появлению интенсивных токов ТСР с максимумом в области  $147^{\circ}\text{C}$  (рис.4 А, кривая 2). На кривой ТСД исходной пленки наблюдалось два максимума: небольшой по величине  $\alpha$ -максимум при  $98^{\circ}\text{C}$ , связанный со стеклованием полимера, и значительный по величине  $\rho$ -максимум при  $147^{\circ}\text{C}$ , связанный с процессами проводимости в пленке (рис.4 Б, кривая 1).

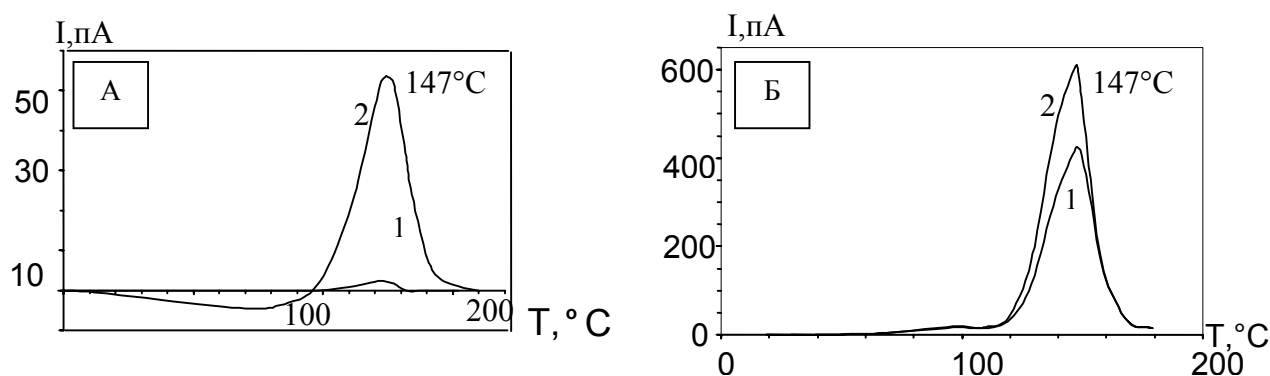


Рис. 4. Кривые ТСР(А) и ТСД (Б) исходной (1) и модифицированной (2) пленки ПЭТ-Э в НЧ-разряде:  $I=100$ мА,  $\tau=180$ с, давление воздуха 13,3Па.

Величина  $\rho$ -максимума токов ТСД для пленки, заряженной в разряде переменного тока, возрастает примерно в 1,5 раза (рис.4 Б, кривая 2). Это объясняется появлением в полимере дополнительных подвижных зарядов, приводящих к небольшому росту проводимости  $\delta$ . При этом удельное объемное сопротивление исходной и модифицированной пленок имеет высокое значение порядка  $10^{17}$  Ом·м. Зависимость  $\lg\delta$  от обратной температуры  $1/T, K^{-1}$  имеет линейную зависимость, т.е. проводимость исходной и модифицированной пленок экспоненциально возрастает с увеличением температуры. Энергия активации проводимости  $E_a$  не меняется в широком интервале температур (от  $20^\circ C$  до  $190^\circ C$ ) и составляет 1,44 эВ. Это свидетельствует об отсутствии зависимости механизма проводимости от состояния полимера. Известно, что проводимость в полимере связана с двумя видами носителей зарядов: первый – подвижные ионы, второй – локализованные электроны, способные перемещаться за счет прыжкового механизма. Отсутствие влияния физического состояния матрицы полимера на энергию активации проводимости указывает в пользу прыжкового механизма транспорта электронов по локализованным состояниям.

Показано, что межэлектродная поляризация плёнки ПЭТ-Э при  $30^\circ C$  и последующий линейный нагрев образца приводили к возникновению в области низких температур положительных токов ТСД, характеризующихся максимумом при  $60^\circ C$ , и в высокотемпературной области отрицательных токов ТСД, характеризующихся максимумом при  $140^\circ C$ . Положительные токи ТСД связаны с релаксацией полярных фрагментов макромолекул, а отрицательные – гомозаряда в плёнке ПЭТ-Э ( $\rho$ -максимум). Термостимулированная релаксация гомозаряда наблюдается в той же области температур, что и ТСП избыточного заряда, связанного с объёмным перераспределением инжектированных из разряда электронов. Этот экспериментальный факт указывает на то, что даже при отсутствии ЧР наблюдается инжекция электронов из металлического электрода (катода) в поверхностные слои плёнки ПЭТ-Э, помещенной в электрическое поле между двумя электродами, и последующая локализация электронов на структурных ловушках. При температуре  $60^\circ C$  электроны, инжектированные из металла в поверхностные слои плёнки ПЭТ-Э, остаются малоподвижными и гомозаряд накапливается в области катода. В результате, в области высоких температур наблюдаются отрицательные токи ТСД, связанные с термической активацией прыжков электронов по соседним ловушкам и их перераспределение в объём образца. Нагрев плёнки ПЭТ-Э до  $90^\circ C$  и её последующая поляризация во внешнем электрическом поле приводят к изменению направления токов ТСД в высокотемпературной области, связанных с объёмной релаксацией гомозаряда, и их направление совпадает с направлением токов релаксации полярных фрагментов макромолекул. Наблюдаемый экспериментальный факт связан с тем, что при  $90^\circ C$  частота прыжков электронов, инжектированных из металла, по ловушкам становится достаточно высокой и электроны успевают за время выдержки образца во внешнем поле перераспределиться через объём образца к положительному электроду (аноду). Так как для перехода электрона из диэлектрика в металл он должен преодолеть потенциальный барьер граничного слоя, то отрицательный заряд накапливается у анода. Термостимулированная релаксация гомозаряда, в этом случае, вызовет в образце токи ТСД, совпадающие по направлению с токами ТСД дипольной релаксации. Дальнейшее увеличение температуры поляризации пленки ПЭТ-Э приводило к росту интенсивности  $\rho$ -максимума, что было связано с ростом частоты прыжков электронов и, соответственно, увеличением интенсивности накопления гомозаряда в области катода. Для

выяснения природы ловушек, на которых локализуются инжектированные в ПЭТ-Э электроны, были проведены исследования процессов образования заряда в неориентированной аморфизованной пленке (ПЭТФ) толщиной 150мкм. Инжекцию электронов в такую пленку осуществляли из плазмы разряда постоянного тока (величина тока разряда 100мА, время обработки 3 мин). Изучение ТСР аморфизованной пленки были затруднены, так как при  $T > 130^{\circ}\text{C}$  наблюдалась кристаллизация, выраженная в виде эндотермического пика на кривых ДСК с максимумом при  $140^{\circ}\text{C}$ . Нагрев исходной пленки ПЭТ-Э приводил к интенсивным токам ТСР в температурном интервале от  $70$  до  $120^{\circ}\text{C}$ , которые были вызваны кооперативными ориентационными процессами в объеме пленки, связанными с ростом подвижности цепей выше температуры стеклования полимера ( $75^{\circ}\text{C}$ ) и предшествующими образованию кристаллической фазы. При температурах выше  $120^{\circ}\text{C}$  токи ТСР падали до нулевых значений.

Заряжение пленки ПЭТФ в разряде в тех же условиях, что и пленки ПЭТ-Э, приводило к образованию в поверхностных слоях избыточного отрицательного заряда, величина которого была более чем в 6 раз меньше, чем величина заряда, образующегося в пленке ПЭТ-Э, содержащей 35% кристаллической фазы. На термограммах ТСР аморфизованной пленки в области  $130^{\circ}\text{C}$  наблюдался максимум релаксации отрицательного заряда, интенсивность которого была в на порядок ниже интенсивности максимума токов ТСР в плёнке ПЭТ-Э, заряженной в плазме.

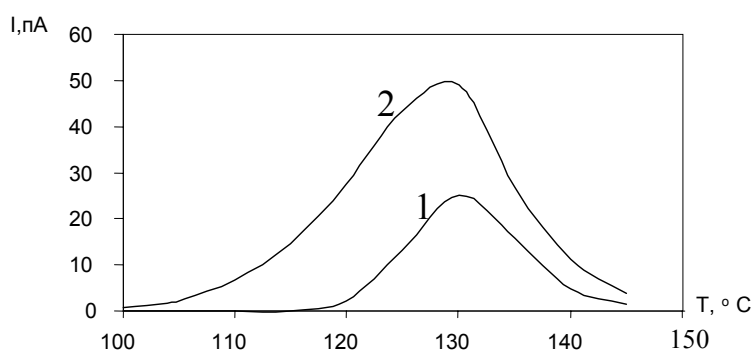


Рис. 5. Термограммы токов ТСР аморфной (1) и кристаллизованной при  $150^{\circ}\text{C}$  пленки ПЭТФ, заряженной в тлеющем разряде.

Нагрев аморфизованной пленки ПЭТФ до температуры  $150^{\circ}\text{C}$  приводил к её частичной кристаллизации. Заряжение такой пленки приводит к трехкратному росту величины избыточного отрицательного поверхностного заряда и росту интенсивности максимума токов ТСР при  $130^{\circ}\text{C}$ . Эти результаты могут быть объяснены тем, что плёнка ПЭТФ имеет на порядок меньшую концентрацию ловушек электронов по сравнению с пленкой ПЭТ-Э, содержащей особенно высокую концентрацию ловушек на границе раздела кристаллической и аморфной фазы. В результате концентрация электронов, инжектированных в пленку ПЭТФ, была на порядок меньше, чем концентрация электронов, инжектированных в пленку ПЭТ-Э. Этот вывод подтверждается тем, что образование кристаллической фазы в аморфизованной пленке приводит к росту величины отрицательного поверхностного заряда, инжектированного в поверхностные слои пленки из разряда. Таким образом, во внешнем электрическом поле в пленке ПЭТ-Э, находящейся между двумя электродами, наблюдаются процессы накопления избыточного отрицательного заряда в приэлектродной области. При низких температурах гомозаряд накапливается в поверхностном слое пленки, расположенном у катода, и его образование вызвано захватом на структурные ловушки инжектированных из отрицательного электрода электронов. При высоких температурах электроны могут перераспределяться через объем образца к положительному электроду, что приводит к накоплению гомозаряда в поверхностном слое пленки ПЭТ-Э, расположенном у

анода. Основная доля структурных ловушек в пленке связана с существованием кристаллической фазы в ее объеме.

На поверхности кристаллитов, являющейся границей раздела кристаллической и аморфной фазы, наблюдаются структурные неоднородности (флуктуации плотности вещества). Эти структурные неоднородности являются ловушками для электронов, инжектированных в поверхностные слои ПЭТ–Э. В результате наблюдается неравномерное распределение ловушек по объему. Их концентрация высока в локальных областях у поверхности кристаллитов и низка в остальной части объема ПЭТ–Э. Это приводит к неравномерному распределению гомозаряда в поверхностном слое пленки и образованию локальных областей перенапряжения, характеризующихся высоким электрическим полем, значительно превышающим среднее поле во всем полимере. С течением времени растет величина гомозаряда, вызванного захватом инжектированных электронов на ловушки, напряженность поля в локальной области перенапряжения увеличивается до значения, достаточного для разрушения полимера в данной области.

Поляризация образца слюдяной бумаги при температуре 350°C в поле  $10^6$  В/м показала, что кривые токов ТСД монотонно возрастают и не имеют характерных максимумов. Это связано, по-видимому, с тем, что при изготовлении слюдяной бумаги слюду расщепляют на мелкие фракции, тем самым создавая условия для высокой ионной подвижности.

Температурная зависимость проводимости слюдяной бумаги имеет сложный характер. При комнатной температуре  $\sigma$  составляет порядка  $10^{-12}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ; с ростом температуры до 100°C проводимость уменьшается до величины порядка  $10^{-16}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ; дальнейшее увеличение температуры приводит к монотонному возрастанию проводимости до значений порядка  $10^{-12}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ . По-видимому, высокая электропроводность слюдяной бумаги при низких температурах связана с наличием в межслойных промежутках адсорбированной воды, присутствие которой увеличивает ионную подвижность в образце. Нагрев приводит к десорбции воды и уменьшению проводимости в интервале от 20°C до 100°C.

Пропитка слюдяной бумаги эпоксиноволачным связующим вызывала существенное изменение характера проводимости материала. При комнатной температуре  $\sigma$  резко уменьшалась и составляла  $\sim 10^{-17}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ . При нагреве образца наблюдалось сначала некоторое уменьшение проводимости, связанное с наличием небольшого количества адсорбированной воды, а затем проводимость увеличивалась и при 200°C достигала значений порядка  $10^{-12}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ . Таким образом, эпоксиноволачное связующее «экранирует» частицы слюды и уменьшает доступ к ним влаги, что приводит к улучшению диэлектрических характеристик материала в области низких температур.

Поляризацию пленки эпоксиноволачного связующего (ЭПС) проводили во внешних полях напряженностью  $4 \cdot 10^6$  В/м и  $1 \cdot 10^6$  В/м при температуре 150°C. После поляризации в поле напряженностью  $4 \cdot 10^6$  В/м на кривых ТСД при температурах выше 120°C наблюдались обратные (отрицательные) токи, связанные с накоплением в образце гомозаряда, возникающего за счет приэлектродной инжекции, которая развивается при наличии сильной микродефектности исследуемого материала (трещины, разломы и т.п.). Уменьшение величины поляризующего поля до  $1 \cdot 10^6$  В/м приводит к уменьшению величины гомозаряда в образце и обратные токи наблюдаются при более высоких температурах – выше 155°C. В области 110–120°C имеется

максимум, который может быть связан с «размораживанием» в ЭПС подвижности полярных сегментов или ионов при температуре стеклования.

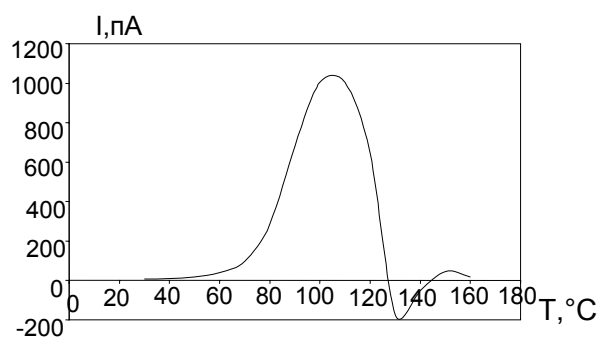


Рис.6. Термограмма токов ТСД для эпоксиноволачного связующего. Поляризация при  $E=4 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ ,  $T=150^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 20$  мин.

Проводимость лаковой пленки сильно зависела от величины электрического поля. В поле  $1 \cdot 10^6 \text{ В/м}$  проводимость резко увеличивалась от  $10^{-17} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  до  $10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при возрастании температуры от комнатной до  $150^\circ\text{C}$ , приближаясь к значениям, характерным для полупроводников.

Уменьшение напряженности поля до  $1 \cdot 10^5 \text{ В/м}$  приводило к снижению проводимости при комнатной температуре примерно в 2 раза и на 2 порядка при  $150^\circ\text{C}$ . Этот факт указывает на наличие в образце токов, связанных с возникновением микроразрядов в микротрещинах материала образца. Подобные процессы не наблюдались при исследовании образца в температурном интервале  $20\text{--}100^\circ\text{C}$  в электрическом поле напряженностью  $1 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ , а при более высоких температурах и напряженностью  $1 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ . Значения проводимости при этом изменялись от  $10^{-17} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  до  $10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, в исследованной пленке ЭПС при отверждении образуются дефекты, ограничивающие условия эксплуатации материала в электрических полях.

На основании исследований проводимости слюдяной бумаги, эпоксиноволачного связующего и слюдяной бумаги, пропитанной эпоксиноволачным связующим, можно заключить, что проводимость последней в значительной степени связана с проводимостью связующего. Следует отметить, что при температурах выше  $140^\circ\text{C}$  кривая температурной зависимости проводимости слюдяной бумаги, пропитанной ЭПС, имеет более пологий вид, чем соответствующая кривая для ЭПС. При температуре  $150^\circ\text{C}$  проводимость бумаги, пропитанной ЭПС на два порядка ниже, чем для ЭПС. Очевидно, что подвижность молекул ЭПС, заключенных между чешуйками слюды, сильно ограничена и поэтому при температурах выше температуры стеклования не наблюдается резкого роста проводимости, характерного для чистого эпоксиноволачного связующего.

Поляризация слюдяной бумаги, пропитанной ЭПС, проводилась во внешнем поле  $10^6 \text{ В/м}$  при температуре  $150^\circ\text{C}$ . На термограмме токов ТСД (рис. 7, кривая 1) наблюдалось два максимума: при  $60^\circ\text{C}$  и  $115^\circ\text{C}$ . Первый расположен ниже температуры стеклования и связан с «размораживанием» подвижности полярных фрагментов. Второй максимум связан с «размораживанием» подвижности цепей макромолекул при температурах выше температуры стеклования ЭПС. Токи ТСД в данной области температур связаны с дипольно-сегментальной подвижностью и подвижностью ионов, образующихся в ходе полимеризации ЭПС. Максимумы ТСД, характерные для слюды, не наблюдались, поскольку находятся в значительно более высокотемпературной области. Поляризацию стеклоткани, пропитанной ЭПС, (рис. 7, кривая 2) проводили в тех же условиях, что и слюдяной бумаги, пропитанной ЭПС. На термограмме токов ТСД наблюдалось два максимума: при  $60^\circ\text{C}$  и  $90^\circ\text{C}$ . Первый максимум аналогичен рассмотренному выше. Следует отметить, что высокотемпературный максимум, связанный с ЭПС

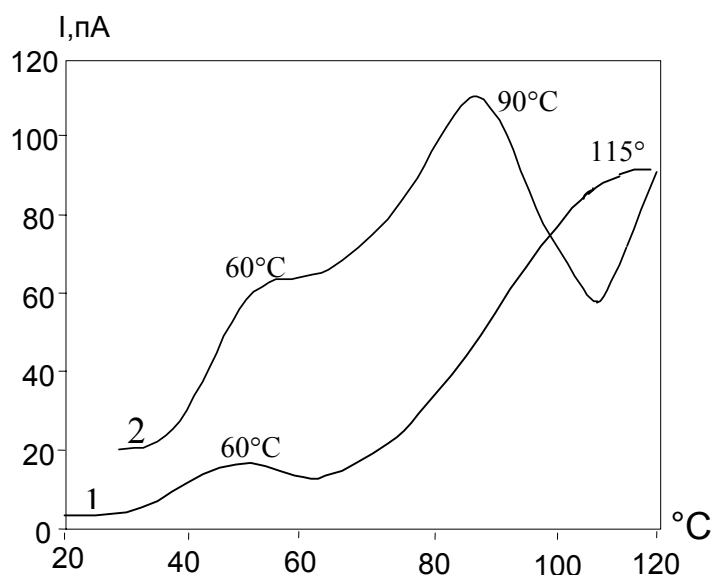


Рис.7. Термограмма токов ТСД для слюдяной бумаги(1) и стеклоткани (2), пропитанных эпоксисиловолачным связующим. Поляризация при  $E=10^6$ В/м,  $T=150^\circ\text{C}$ ,  $\tau=20$  мин.

в стеклоткани смещен на  $25^\circ\text{C}$  в область более низких температур по сравнению с ЭПС в слюдяной бумаге. Результаты ДСК показали, что слой ЭПС в стеклоткани характеризуется более низкой температурой стеклования -  $100^\circ\text{C}$  по сравнению со слоем ЭПС в слюдяной бумаге -  $133^\circ\text{C}$ . Этот факт может быть связан с неоднородной плотностью сшивки или неоднородным распределением пластификатора в ЭПС. В качестве объекта исследований был выбран

композит, состоящий из пленки ПЭТ-Э (1), слюдяной бумаги, пропитанной эпоксисиловолачным связующим (2), и стеклоткани, также пропитанной эпоксисиловолачным связующим (3) (рис. 8 А). Исследуемый композит поляризовали при  $150^\circ\text{C}$  между двумя прижимными электродами в постоянном электрическом поле напряженностью  $10^6$ В/м в течение 20 минут. Далее образец охлаждали в поле до  $20^\circ\text{C}$  для измерения ТСД. Поляризацию во внешнем поле осуществляли в двух различных направлениях. Первоначально поляризация композита осуществлялась в электрическом поле, вектор напряженности ( $E$ ) которого был направлен от пленки ПЭТ-Э к стеклоткани, пропитанной ЭПС (рис. 8 Б). Термограмма токов ТСД композита имела два максимума: при  $60^\circ\text{C}$  и  $115^\circ\text{C}$ . Оба максимума были характерны для ЭПС, которая служила пропитывающим составом для слюдяной бумаги (рис.10А). Следует отметить, что максимумов, характерных для перераспределения отрицательного заряда в пленке ПЭТ-Э, не наблюдалось.

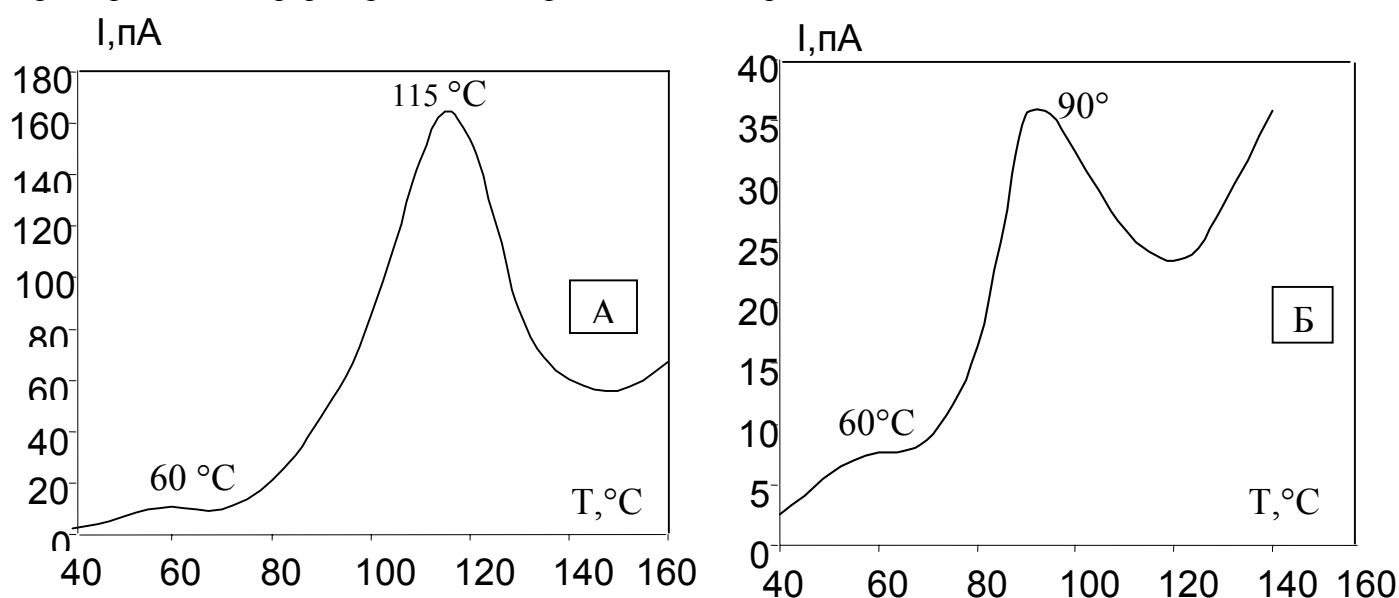


Рис.10. Термограммы токов ТСД композита, состоящего из пленки ПЭТ-Э, слюдяной бумаги и стеклоткани, пропитанных эпоксисиловолачным связующим: А – направление поляризации по рис.8 Б; Б - направление поляризации по рис.8 В.

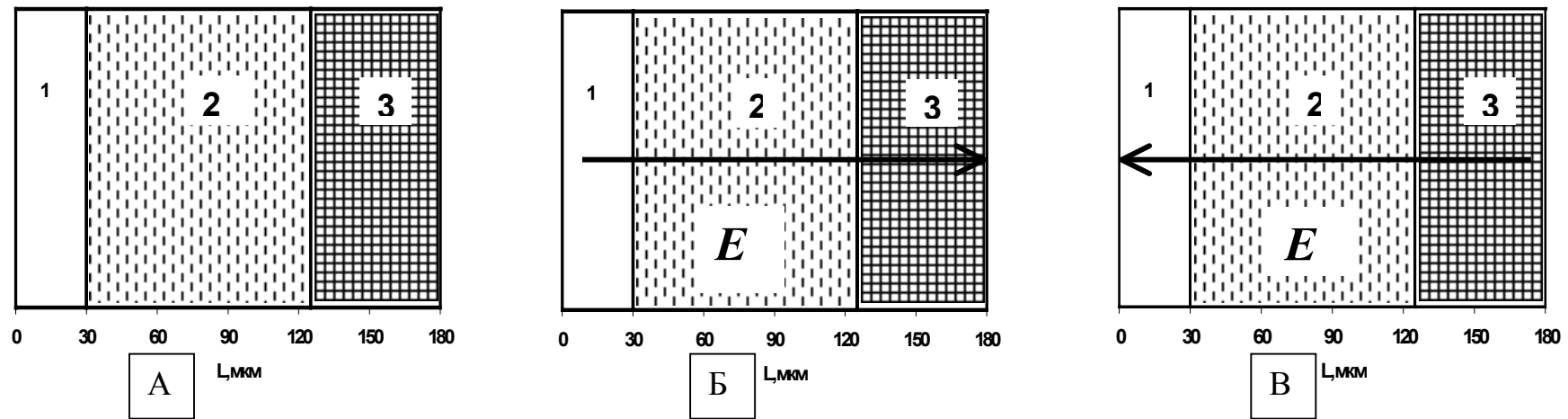


Рис.8. А – композит: 1–пленка ПЭТ–Э, 2–слядьяная бумага, пропитанная ЭПС, 3–стеклоткань, пропитанная ЭПС. Б, В–схемы возможного перераспределения объемного заряда в композите при различных направлениях поляризации ( $E=10^6$ В/м,  $T=150^\circ\text{C}$ ,  $\tau=20$ мин.).

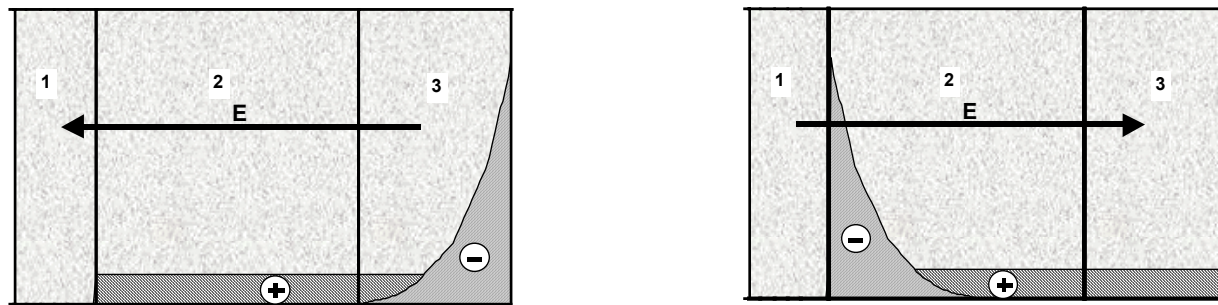


Рис.9. Схемы перераспределения объемного заряда в композите при различных направлениях поляризации.



Далее направление  $E$  электрического поля изменяли на противоположное (рис. 8 В). Затем проводили поляризацию композита в тех же условиях. Термограмма токов ТСД композита имела два максимума: при  $60^{\circ}\text{C}$  и  $90^{\circ}\text{C}$  (рис.10 Б). Оба максимума наблюдались ранее для ЭПС, которая служила пропитывающим составом для стеклоткани.

Известно, что поляризация объёма диэлектрика во внешнем электрическом поле, в отсутствие приводящих к разрядным процессам микропустот, связана: во-первых, с локальными смещениями зарядов на расстояния, не превышающие размеры межатомных связей; во-вторых, перемещениями подвижных зарядов на расстояния, во много раз превышающие размеры одной связи. К первому типу относятся процессы ориентации диполей, например, полярных фрагментов макромолекул в полимерном диэлектрике. Ко второму типу – процессы, связанные с проводимостью диэлектрика, например, ионный транспорт или различные механизмы перемещения электронов по ловушкам.

Анализ приведенных выше результатов показывает, что поляризация композиционного материала вызвана перераспределением отрицательного заряда в эпоксиноволачной смоле, связанного с присутствием подвижных отрицательных ионов. При первоначальном направлении поля отрицательные ионы перемещаются в слой ЭПС, пропитывающей слюдяную бумагу, и наблюдается характерный максимум токов ТСД –  $115^{\circ}\text{C}$ . При противоположном направлении поля отрицательные ионы перемещаются в слой ЭПС, пропитывающей стеклоткань, и наблюдаются характерный максимум токов ТСД –  $90^{\circ}\text{C}$ .

В то же время в трёхслойном композиционном материале не наблюдается максимума релаксации электронной поляризации плёнки ПЭТ-Э в области  $140\text{-}150^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что при поляризации композита в поле, направленном от ПЭТ-Э к стеклоткани, процессы инжекции электронов из катода в объём плёнки ПЭТ-Э невозможны из-за отсутствия электронного транспорта в ЭПС, пропитывающей стеклоткань и слюдяную бумагу. При противоположном направлении поля инжектированные в плёнку ПЭТ-Э электроны при температуре поляризации  $150^{\circ}\text{C}$  перемещаются через объём плёнки к границе раздела с ЭПС и рекомбинируют с избыточными положительными зарядами в ЭПС, которые образуются при неравновесном распределении заряда в объёме ЭПС. Реальное распределение объёмного заряда в композите, состоящем из трёх слоёв: плёнка ПЭТ-Э - наполненная ЭПС слюдяная бумага - наполненная ЭПС стеклоткань, схематично представлено на рис.9.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что в композиционном материале, состоящем из слоёв стеклоткани и слюдяной бумаги, наполненных эпоксиноволачной смолой, и плёнки ПЭТ-Э, отсутствует процесс накопления объёмного заряда в плёнке ПЭТ-Э. Этот процесс связан с инжекцией электронов в поверхностные слои плёнки из катода. Причём основная часть ловушек, в которых локализируются инжектированные электроны, находится на границах раздела кристаллитов с аморфной фазой и, поэтому, занимает малую часть от объёма образца. Таким образом, в ПЭТ-Э существуют локальные области с аномально высокой концентрацией ловушек. Это приводит к неоднородному распределению инжектированных электронов и образованию локальных областей с высокой плотностью заряда, характеризующихся высокими значениями электрических полей. При достижении локальных полей определённых значений, в данных областях происходит разрушение образца. Включение плёнки в композит приводит к её изоляции от металлических электродов слоями диэлектрика, в котором отсутствует электронный транспорт. В результате, пробой плёнки ПЭТ-Э, а значит и всего

композита в целом, не происходит до тех пор, пока не наступит разрушение внешних диэлектрических слоёв, отделяющих плёнку от электродов. Это должно приводить к увеличению времени жизни композита с плёнкой ПЭТ-Э в электрическом поле, а значит и к уменьшению вероятности пробоя по сравнению с композитом без плёнки.

Аналогичный результат был получен при поляризации композиционного материала, содержащего модифицированную в тлеющем НЧ-разряде пленку ПЭТ-Э. Модификация пленки ПЭТ-Э не оказывала влияния на перераспределение заряда в композиционном материале и поляризация образца происходила за счёт процессов переноса заряда по эпоксисинволачной смоле.

**Глава 5. Электрические и диэлектрические испытания композиционных материалов и систем изоляции.** В данной главе были продолжены исследования композиционных материалов с целью получения доказательства повышения электрической прочности при введении в композицию пленки ПЭТ-Э с использованием известных методов электрических испытаний и математического аппарата на основе трехпараметрического распределения Вейбулла.

Для испытания были взяты плоские образцы композита, аналогичные тем, которые использовались при исследовании объемно-зарядовых процессов. Композит СПМ состоит из слюдяной бумаги, стеклоткани, пропитанных ЭПС, толщина 0,25мм; СПМ-II-30 состоит из слюдяной бумаги, стеклоткани, пропитанных ЭПС, толщина 0,28мм. В качестве центрального слоя содержит пленку ПЭТ-Э толщиной 0,03 мм. Все образцы композита, содержащие пленку ПЭТ-Э, имели повышенную электрическую прочность по сравнению с образцами без пленки. Квар.=5,3% для СПМ и Квар.=3,9% для СПМ-II-20, что свидетельствует об однородности композита с пленкой. Значения длительной электрической прочности (ДЭП), полученные для образцов при напряженности электрического поля 26 МВ/м в исходном состоянии и после теплового старения при 160°С в течение 100 и 200 ч, были обработаны по двухпараметрическому распределению Вейбулла. Параметры распределения приведены в табл.1. Испытания проводились в партии, в которой объединялись образцы с допуском по толщине 0,02мм.

Таблица 1

Параметры распределения Вейбулла времени до пробоя образцов изоляции при  $E = 26 \text{ МВ/м}$ , частотой 50 Гц ( $\delta$  - наклон прямой,  $\eta$  - среднее значение при 63 % вероятности)

| Наименование образцов | Исходное состояние |                               | После теплового старения при 160° С, 100 ч |                               | После теплового старения при 160° С, 213 ч |                               |
|-----------------------|--------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
|                       | $\delta$           | $\eta \times 10^5, \text{ с}$ | $\delta$                                   | $\eta \times 10^5, \text{ с}$ | $\delta$                                   | $\eta \times 10^5, \text{ с}$ |
| СПМ                   | 0,8                | 1,20                          | 1,32                                       | 0,256                         | 0,99                                       | 0,662                         |
| СПМ - II -30          | 1,36               | 1,77                          | 1,74                                       | 0,819                         | 1,66                                       | 0,762                         |

Видно, что ДЭП образцов с пленкой значительно превосходят образцы без пленки. Кроме того, присутствие пленки улучшает однородность образца, что видно по увеличению коэффициента  $\delta$ . Таким образом, эксперименты на плоских образцах подтверждают выводы о том, что присутствие пленки ПЭТ-Э увеличивает длительную и кратковременную электрическую прочность изоляции.

Известно, что наиболее точно явление пробоя в изоляционном материале описывается с помощью распределения Вейбулла, которое задает распределение случайной экспериментальной величины, имеющей минимальное или максимальное значения из всех возможных реализаций. В задачах высоковольтной техники используется ограниченное снизу, то есть имеющее

минимальное значение, распределение Вейбулла. Примером может служить процесс электрического старения диэлектрика, связанный с накоплением в нем гомозаряда и образованием локальных областей с высокими значениями напряженности электрического поля, в которых развивается пробой. Этот процесс характеризуется начальным минимальным временем  $t_0$ , в течение которого вероятность пробоя равна нулю, так как локальные поля, вызванные накоплением гомозаряда, еще не достигли высоких значений. Для теоретического анализа явлений пробоя в композиционном материале использовали трехпараметрическое распределение Вейбулла, характеризующееся параметрами:  $\eta = t_{63} - t_0$  (63%-ный квантиль распределения),  $t_{63}$  – среднее время до пробоя (время до пробоя с вероятностью 63%),  $\delta$  – дисперсия (показатель экспоненты Вейбулла),  $t_0$  – начальное значение (начальное время, в течение которого вероятность пробоя диэлектрика равна нулю).

Наилучшую оценку параметров  $\eta$ ,  $\delta$  и  $t_0$  трехпараметрического распределения Вейбулла для реализаций случайной величины  $t$  можно получить из метода моментов. Использование этого метода позволяет установить выражение плотности вероятности распределения  $f(t)$  из экспериментально полученных реализаций случайной величины времени до пробоя диэлектрика  $t$ . На основании полученных экспериментальных данных по временам пробоя образцов в электрическом поле напряженностью 26МВ/м и частотой 50Гц, был проведен расчёт параметров распределения Вейбулла для пленки ПЭТ-Э, СПМ (стеклоткань+слюдяная бумага, пропитанные эпоксисинволачным связующим), СПМ-II-30 (то же, что СПМ+ПЭТ-Э) в качестве центрального слоя. Образцы изготавливались термопрессованием. Для этого по данным выборки времён до пробоя  $t_i$  делается расчёт среднеарифметического значения  $\bar{t}$  и среднего квадратического отклонения  $s$  эмпирического коэффициента асимметрии распределения  $g$ . Если предположить, что значение эмпирического коэффициента асимметрии распределения  $g$  равно теоретическому значению асимметрии распределения  $g_b$ , то по приведенной в работе Хаушильда и Моша таблице сразу можно дать оценку для  $\delta$  - показателя экспоненты. Далее, по найденным в таблице значениям табулированных величин  $g_b$  и  $k_b$  рассчитывается 63%-ный квантиль  $\eta$  и начальное значение  $t_0$  трёхпараметрического распределения Вейбулла.

Для более точного определения величин  $\eta$ ,  $g_b$  и  $k_b$  на основе данных указанной выше таблицы были построены графики зависимости  $\eta$ ,  $g_b$  и  $k_b$  от величины  $g_b$ . Найденные из метода моментов величины  $t$ ,  $s$ ,  $g_b$ ,  $k_b$ ,  $\delta$ ,  $\eta$  и  $t_0$  для исследованных диэлектрических материалов имели значения, приведённые в табл.2.

Для разных вариантов композиционного материала СПМ-II-30, содержащего пленку ПЭТ-Э в качестве центрального слоя, получены разные распределения с параметрами.

Таблица 2

Параметры трехпараметрического распределения Вейбулла

| Материал                        | $\bar{t} \cdot 10^5, c$ | $s \cdot 10^5, c$ | $g_b$           | $g_b$           | $k_b$        | $\delta$      | $\eta, 10^5 \cdot c$ | $t_0, 10^5 \cdot c$ |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|----------------------|---------------------|
| Плѐнка ПЭТ-Э                    | 1,53                    | 0,20              | 1,789           | 0,949           | 0,985        | 1,04          | 0,21                 | 1,33                |
| Композит без плѐнки<br>СПМ      | 4,57                    | 6,26              | 3,072           | 1,58            | 1,18         | 0,76          | 3,96                 | 0                   |
| Композит с плѐнкой<br>СПМ-II-30 | 1,76-<br>14,1           | 0,76-<br>3,77     | 1,775-<br>1,025 | 0,897-<br>0,596 | 0,97-<br>0,9 | 1,08-<br>1,54 | 0,85-<br>6,32        | 1,276-<br>8,38      |

Наблюдаемый разброс параметров распределения композиционного материала связан с отличием в режимах его приготовления.

Следует отметить, что для СПМ  $t_{01}=0$ . Очевидно, композит, состоящий из слоев стеклоткани и слюдяной бумаги, пропитанных эпоксисилоачным связующим, является неоднородным материалом, содержащим в своем объеме большое количество микродефектов в виде полостей и микротрещин. В результате при определенном распределении этих дефектов существует не нулевая вероятность пробоя такого материала в начальный момент времени. Полученные величины  $\eta_1$  и  $\delta_1$  хорошо коррелируют с величинами, найденными из двухпараметрического распределения Вейбулла при  $t_0=0$ :  $\eta=3.77 \cdot 10^5$  с,  $\delta = 0.75$ .

Выше было показано, что основной причиной пробоя пленки ПЭТ-Э может служить интенсивное накопление гомозаряда в поверхностных слоях. Его образование связано с инжекцией электронов из отрицательного электрода и их неравномерным распределением в поверхностном слое образца, который имеет аномально высокую концентрацию ловушек на границах кристаллитов с аморфной фазой. В результате с течением времени в поверхностном слое пленки образуются локальные области, характеризующиеся аномально высокими значениями напряженности электрического поля. За время  $t > t_{02}$  в этих областях электрический заряд и напряженность создаваемого им поля в данных областях достигают значений, при которых происходит пробой диэлектрика. Введение пленки ПЭТ-Э в качестве центрального слоя в композиционный материал, состоящий из чередующихся слоев стеклоткани и слюдяной бумаги с эпоксисилоачным связующим, приводит к изоляции поверхностных слоев пленки от металлических электродов и отсутствию в ее поверхностных слоях процесса накопления гомозаряда. Для того чтобы процесс образования гомозаряда в пленке ПЭТ-Э продолжился необходимо дополнительное время  $t > t_{02} + t_{01}$  для пробоя диэлектрических слоев, расположенных между ПЭТ-Э и металлическим электродом. В результате, если время до пробоя слоев композиционного материала без пленки во внешнем поле равно  $t_1$ , а время до пробоя пленки равно  $t_2$ , то для пробоя композита, содержащего пленку ПЭТ-Э в качестве центрального слоя, необходимо время  $t = t_1 + t_2$ .

Вероятность пробоя композита СПМ-II-30 за время  $\tau$   $[P(t_0 \leq t < \tau)]$  определяется как вероятность логического произведения двух событий: первое – пробой диэлектрических слоев, лежащих между ПЭТ-Э и металлическим электродом; второе – пробой слоя ПЭТ-Э при условии того, что первое событие произошло. Если  $P_1(t_{01} \leq t_1 < \tau)$  – вероятность пробоя слоев стеклоткани и слюдяной бумаги с эпоксисилоачным связующим, а  $P_2(t_{02} \leq t_2 < \tau)$  – вероятность пробоя слоя пленки ПЭТ-Э, то  $P(t_0 \leq t < \tau) = P_1(t_{01} \leq t_1 < \tau) \times P_2(t_{01} + t_{02} \leq t_2 < \tau)$ .

Функция распределения величины времени до пробоя композита СПМ-II-30  $F(t)$  определяется из функций распределения времён до пробоя слоя стеклоткани и слюдяной бумаги с эпоксисилоачным связующим  $F_1(t)$  и центрального слоя ПЭТ-Э  $F_2(t)$  на основании:

$$F(t) = \begin{cases} F_1(t) \times F_2(t) & (t > t_{01} + t_{02}) \\ 0 & (t \leq t_{01} + t_{02}) \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_{01}$  - минимальное значение времени до пробоя слоя стеклоткани и слюдяной бумаги с эпоксисилоачным связующим, а  $t_{02}$  – минимальное значение времени до пробоя пленки ПЭТ-Э.

Окончательное выражение для плотности распределения времени до пробоя  $f(t)$  композиционного материала СПМ-II-30 имеет вид:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\eta_1} \exp\left[-\frac{t - (t_{02} + \eta_2)}{\eta_1}\right] & t > t_{02} + \eta_2 \\ 0 & t \leq t_{02} + \eta_2 \end{cases} \quad (2)$$

Согласно полученному выражению, введение плёнки ПЭТ-Э даже в дефектный композиционный материал, содержащий микрополости и имеющий не нулевую вероятность пробоа в начальный момент времени  $t_0=0$ , приводит к значительному увеличению электрической прочности материала, которое выражается в росте минимального времени до пробоа  $t_0=t_{02}+\eta_2$  и среднего времени до пробоа  $t_{63}=\eta_1+\eta_2+t_{02}$ . Согласно проведенному расчету минимальное время до пробоа СПМ-II-30 должно быть равно  $t_0 = 1.54 \cdot 10^5$  с, а среднее время до пробоа  $t_{63} = 5.5 \cdot 10^5$  с в электрическом поле напряженностью 26 МВ/м. На рис.11 пунктирной линией (кривая 1) представлена функция распределения времени до пробоа композиционного материала, содержащего пленку ПЭТ-Э в качестве центрального слоя, рассчитанная по уравнению (2). Точки на координатной плоскости  $[(t-t_0); F(t)]$  получены на основании всех возможных сумм  $t=t_1+t_2$ , составленных из всех реализаций случайных величин времён до пробоа СПМ -  $t_1$  и пленки ПЭТ-Э -  $t_2$ , и расчёта по (1) соответствующих значений функции распределения  $F(t_1+t_2)$ .

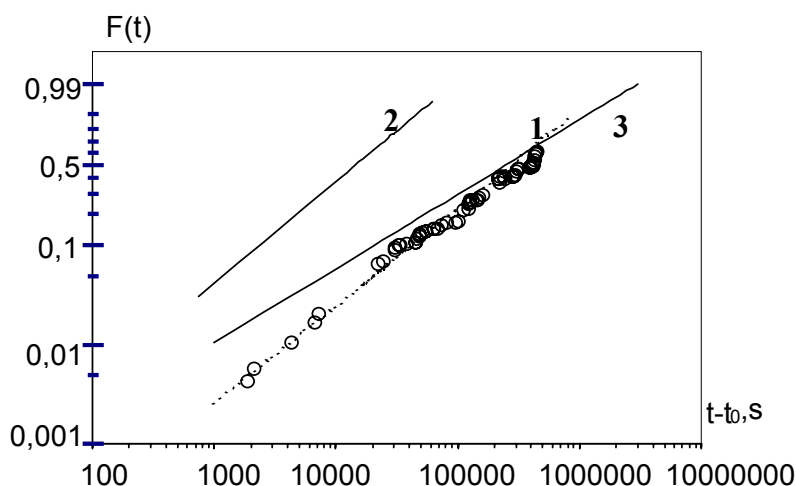


Рис.11. Трёхпараметрическое распределение Вейбулла:

1 – СПМ-II-30, расчетная кривая, полученная из выражения (2). Точки получены на основании сумм, составленных из всех реализаций случайных величин времени до пробоа СПМ и ПЭТ-Э. 2 - ПЭТ-Э и 3 – СПМ. Функции распределения получены по экспериментальным данным.

Видно, что выражение (2) с хорошей точностью описывает распределение времени до пробоа многослойного композиционного материала СПМ-II-30. Таким образом, введение пленки ПЭТ-Э в композиционный материал в качестве центрального слоя приводит к росту  $t_0$  и  $t_{63}$  по сравнению с исходными материалами.

Преимущества слюдяных лент с пленкой были выявлены при сравнительных испытаниях на реальных электродвигателях. Корпусная изоляция катушек при сборке обмотки статора высоковольтного электродвигателя подвергается значительным деформациям, особенно при укладке шаговых катушек. Поэтому изоляция катушек должна сохранять высокую кратковременную и длительную электрическую прочность после воздействия деформаций на стадии изготовления статора.

Исходя из этого была предложена «полужесткая» система на предварительно пропитанной ленте ЛСМ, сохраняющей жесткость при высокой температуре после отверждения связующего со значением модуля упругости при изгибе  $E=3,5 \cdot 10^{10}$  Па при температуре 100°C. Для лобовых частей была разработана пропитанная лента ЛСУ, обладающая гибкостью после отверждения.

Отработка конструкции систем изоляции проведена в АО «Электросила». В качестве конструкции изоляции исследованы следующие системы: изоляция пазовой части - лента пленкостеклослюдяная марки ЛСМ, изоляция лобовых частей, головок и выводных концов - лента пленкостеклослюдяная ЛСУ. Испытания проведены на статорных катушках электродвигателя ДАП 14-49-4МУХЛ4, номинальное напряжение 6,6 кВ, мощность 1250 кВт. Корпусная изоляция в пазовых частях катушки выполнена из 10 слоев ленты ЛСМ толщиной 0,14мм с перекрытием в 1/2 толщины, с учетом опрессовки изоляции на 30-35%, с заходом в лобовые части, а корпусная изоляция лобовых частей, головок и выводных концов из 6 слоев ленты ЛСУ толщиной 0,13мм с перекрытием в 1/2 ширины. Место стыка изоляции из лент ЛСМ и ЛСУ выполнялась способом «обратный конус». Конус, длиной 50 мм, для двигателей напряжением 6 кВ начинался в середине лобовой части. Корпусная изоляция катушек была изготовлена гидростатической опрессовкой в битумном автоклаве. Методика испытаний опытных катушек: определение запаса кратковременной электрической прочности изоляции катушек, вынутых из статора. Данные по определению запаса кратковременной электрической прочности изоляции катушек, вынутых из статора, показали, что изоляция на основе ленты ЛСМ имеет высокий запас электрической прочности. Минимальное значение пробивного напряжения для более деформированной стороны (нижней) катушки при ее отгибе составило  $U_{пр} = 64$  кВ. Оценка "эластичных" свойств катушечной изоляции путем определения длительной электрической прочности изоляции различных зон катушки была произведена на базовой изоляции на основе предварительно пропитанной ленты ЛСЭП-9125ТТ и новой изоляции на ленте ЛСМ в пазовой части и ЛСУ – в лобовой части и головке. Лента ЛСЭП-9152ТТ состоит из двух стеклоподложек и пропитана полиэфирно-эпоксидным связующим. Кратковременная электрическая прочность (50 % значение) базового варианта изоляции на ленте ЛСЭП-9125ТТ имели следующие значения. Пазовая часть: неотогнутая сторона – 30,5 МВ/м; отогнутая сторона – 28,5 МВ/м. Зона углов: неотогнутая сторона – 28,5 МВ/м; отогнутая сторона - 27 МВ/м. Кратковременная электрическая прочность (50% значение) изоляции на ленте ЛСМ имели следующие значения. Пазовая часть: неотогнутая сторона – 35 МВ/м; отогнутая сторона - 33 МВ/м. Зона углов: неотогнутая сторона – 28,5 МВ/м; отогнутая сторона - 27,5 МВ/м.

Таблица 3

Параметры распределения Вейбулла времени до пробоя  
изоляции катушек электродвигателя АКН2-18-43-12с

| Изоляция    | E=8МВ/м  |           |                   |           |                |           | E=10МВ/м |           |                   |           |                |           |
|-------------|----------|-----------|-------------------|-----------|----------------|-----------|----------|-----------|-------------------|-----------|----------------|-----------|
|             | Пазовая  |           | Зона углов        |           |                |           | Пазовая  |           | Зона углов        |           |                |           |
|             |          |           | Верх<br>неотогнут |           | Низ<br>отогнут |           |          |           | Верх<br>неотогнут |           | Низ<br>отогнут |           |
|             | $\delta$ | $\eta, с$ | $\delta$          | $\eta, с$ | $\delta$       | $\eta, с$ | $\delta$ | $\eta, с$ | $\delta$          | $\eta, с$ | $\delta$       | $\eta, с$ |
| ЛСЭП-9125ТТ | 1,01     | 732       | 1,42              | 773       | 1,03           | 630       | 0,81     | 144       | 0,49              | 181       | 0,66           | 81        |
| ЛСМ         | 2,46     | 1711      | 2,95              | 2202      | 2,30           | 2093      | 1,46     | 1038      | 1,23              | 226       | 0,69           | 213       |

Результаты определения длительной электрической прочности 2 вариантов изоляции натуральных катушек (табл. 3) показывает, что изоляция на пленкосодержащей ленте ЛСМ лучше выдерживает воздействие деформации. Исследование комбинированного воздействия теплового и электрического поля на новую и базовую изоляции проводилось на стержнях-макетах из медной шины при температуре 90°C и напряженности электрического поля E=10МВ/м.

Испытания показали, что новая изоляция более устойчива к комбинированному воздействию (табл. 4). У базового варианта изоляции время жизни резко снижается при повышенной температуре и значение  $\tau$  (63%) составляет 7 ч. У новой изоляции не было ни одного отказа за время старения 1015 ч (при выборке из 15 образцов).

Таблица 4

Время до пробоя изоляции макетов при комбинированном электротепловом воздействии

| Вариант изоляции | $\tau$ (63%) при $E=10\text{МВ/м}$ , частотой 50 Гц |               |
|------------------|---|---------------|
|                  | T исп. = 20°C                                       | T исп. = 90°C |
| ЛСЭП-9125ТТ      | 213   | 7             |
| ЛСМ              | 3517  | 1015          |

Исследования корпусной изоляции на непропитанных слюдяных лентах, содержащих пленку ПЭТ-Э, были проведены на катушках статора высоковольтного взрывозащищенного электродвигателя серии ВАО-2-450. Катушки были изготовлены и испытаны в ООО "Привод-Электромеханик". Для испытаний были выбраны 3 новых типа непропитанных слюдобумажных лент, отличающихся по количеству и типам подложек. Основными элементами новизны являются: исследования изоляции на слюдобумажных лентах, содержащих пленку ПЭТ-Э; исследования изоляции на слюдобумажной ленте, содержащей нетканную полиэфирную бумагу. Катушки статорной обмотки двигателей ВАО-2-450 были изготовлены по технологии Монолит-2 вакуум-нагнетательной пропиткой эпоксидным компаундом ПК-11. Сравнительные испытания проведены на слюдяных лентах, не содержащих пленку ПЭТ-Э – Элмикапор 53359 и ЛСКО-180Т, а также содержащих в композиции пленку ПЭТ-Э - Элмикапор 533019 и 533015.

Времена до пробоя изоляции измерены при напряженности электрического поля  $E=12$  и  $15$  МВ/м, частотой 50 Гц. Наибольшие времена до пробоя имела изоляция на основе ленты 533015 с двумя подложками - одну из пленки ПЭТ-Э толщиной 20 мкм, а другая - из полиэфирной бумаги. Пробой первого образца изоляции катушки при  $E=12\text{МВ/м}$  на этой ленте произошел через 150 ч, в то время как пробой изоляции на серийной ленте ЛСКО-180Т - через 23 ч. Среднее значение времени до пробоя изоляции при вероятности 63% на ленте 533015 составило 280 ч, а у серийной изоляции на ленте ЛСКО-180Т - 65 ч, т.е. длительная электрическая прочность при  $E=12$  МВ/м на пленочно-слюдяной изоляции примерно в 4 раза превышает значение для изоляции на серийной ленте без пленки. Высокие результаты также получены при испытании изоляции на ленте 533019, имеющей также две подложки - из стеклоткани и пленки толщиной 20 мкм. Пробой первого образца произошел через 96 ч, а среднее значение при вероятности 63% - 180 ч.

Результаты испытаний на длительную электрическую прочность при напряженности поля 15 МВ/м показали, что сохраняется такой же порядок распределения времени до пробоя изоляции, что и при  $E=12$  МВ/м. Наибольшее время до пробоя имеет изоляция на ленте 533015.

Комплексному электрическому старению при напряженности электрического поля  $E=10$  МВ/м и температуре 100° С подвергалось 4 варианта изоляции на лентах 533019, 533015, 533059 и ЛСКО-180Т. В этих условиях все катушки простояли 400 ч без пробоя изоляции. При последующем повышении напряженности до 12 МВ/м через 143 часа пробилась катушка базового варианта на ленте ЛСКО-180Т.

Полученный эффект увеличения длительной электрической прочности изоляции Монолит-2 на слюдяных лентах, содержащих пленки ПЭТ-Э, был подтвержден при повторном испытании

аналогичных вариантов лент на натуральных катушках высоковольтного электродвигателя 2СДГВ-335-4000/3550-28 в АО "Уралэлектротяжмаш". Испытания проведены на непропитанных слюдяных лентах 533019 (композиция стеклоткань - слюдяная бумага - пленка ПЭТ-Э), 533015 (полиэфирная бумага - слюдяная бумага - пленка ПЭТ-Э), 53301 (одна подложка пленки ПЭТ-Э - слюдяная бумага) и базовый вариант на серийной слюдобумажной ленте ЛСКН-160ТТ (стеклоткань - слюдяная бумага - стеклоткань). Всего было изготовлено на ленте 533019 - 8 катушек, на ленте 53801 - 4 катушки, на ленте 533015 - 8 катушек и на ЛСКН-160ТТ - 5 катушек.

Пропитка и термообработка катушек производилась по промышленной технологии изоляции Монолит-2. Толщина изоляции в пазовой части катушки после пропитки составила 2 мм на сторону. Значения  $\text{tg } \delta$  всех вариантов изоляции находятся на одном уровне и соответствуют стандарту предприятия. Уровни частичных разрядов также не имеют существенной разницы между системами изоляции (табл. 5). Распределения Вейбулла времени до пробоя изоляции катушек, приведенные на рис.12, показывает, что длительная электрическая прочность изоляции на слюдяных лентах, содержащих пленку ПЭТ-Э, значительно превышает значение электрической прочности для изоляции на ленте со стеклянной подложкой. Наилучшие результаты по длительной электрической прочности получены у изоляции Монолит-2 катушек, изготовленных на лентах 533019 и 533015 с пленочной подложкой.

Таблица 5

Изменение диэлектрических свойств и амплитуды кажущегося заряда от напряжения изоляции Монолит-2 катушек электродвигателя 2 СДГВ – 335-4000/3550-28

| Номер партии катушек | Изоляционная лента | tg $\delta$ , %, при напряжении |     |     | Qч.р., $10^{-11}$ Кл, при напряжении |     |
|----------------------|--------------------|---------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|-----|
|                      |                    | 3кВ                             | 6кВ | 9кВ | 6кВ                                  | 9кВ |
| 1-8                  | 533019             | 0,8                             | 1,2 | 1,7 | 6                                    | 24  |
| 9-16                 | 533015             | 0,98                            | 1,6 | 2,0 | 10                                   | 35  |
| 17-20                | 53801              | 1,4                             | 1,7 | 2,3 | 7                                    | 25  |
| 21-25                | ЛСКН-160ТТ         | 1,1                             | 1,6 | 2,6 | 5                                    | 20  |

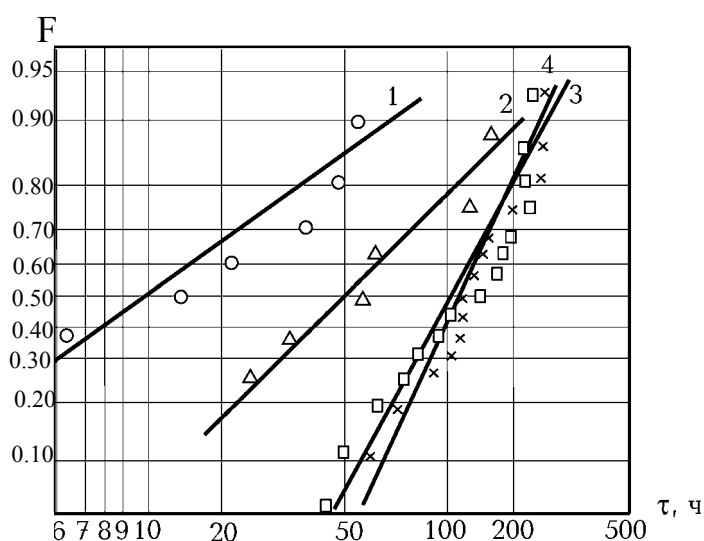


Рис.12. Распределение Вейбулла времени до пробоя изоляции Монолит-2 электродвигателя 2СДГВ при  $E=12$  МВ/м, частотой 50 Гц. 1-ЛСКН-160ТТ; 2-53801; 3-533015; 4-533019.

**Глава 6. Исследование электрофизических свойств изоляции Монотерм.** Проведены исследования изоляции Монотерм на стеклослюдяной ленте Элмикатерм 55409 с увеличенной



толщиной слюдобарьера для высоковольтных обмоток электрических машин. В табл. 6 представлены сравнительные данные по содержанию компонентов в ленте Элмикатерм 55409 с различным содержанием слюдяного барьера.

Таблица 6

Содержание компонентов в ленте Элмикатерм 55409  
с различным содержанием слюдяного барьера

| Вариант | Содержание компонентов, % |           |       |        | Толщина, мм |             | E <sub>пр</sub> ,<br>МВ/м |
|---------|---------------------------|-----------|-------|--------|-------------|-------------|---------------------------|
|         | летучие                   | связующее | слюда | стекло | ленты       | стеклоткани |                           |
| А       | 1,5                       | 42        | 35,5  | 21     | 0,16        | 0,046       | 22,0                      |
| Б       | 0,6                       | 31,5      | 53,7  | 14,2   | 0,21        | 0,046       | 29,0                      |

Вариант А и Б – лента Элмикатерм 55409 на слюдяной бумаге поверхностной плотностью 120 г/м<sup>2</sup> (А) и 160 г/м<sup>2</sup> (Б).

Лабораторные стержни – макеты с изоляцией Монотерм были изготовлены из медной шины МГМ сечением (7x28) мм<sup>2</sup> с радиусом закругления ребер 1 мм. Длина токоведущей части 800 мм, длина изолированной части 740 мм. Изготовление изоляции проводилось гидростатическим способом опрессовки в битумном автоклаве. Односторонняя толщина изоляции 2мм. Сравнительные электрические испытания проводились с целью определения кратковременной и длительной электрической прочности изоляции Монотерм с различным содержанием слюдяного барьера. Анализ функций распределения пробивных напряженностей показал, что по кратковременной электрической прочности Монотерм Б не имеет преимуществ перед изоляцией Монотерм А. Электрическая прочность, оцененная при ступенчатом подъеме испытательной напряженности 1кВ/6 мин, для обеих видов изоляции оказалась практически одинаковой. Таким образом, увеличение слюдяного барьера в изоляции Монотерм не оказало влияния на значение кратковременной электрической прочности. Как и следовало ожидать, результаты испытаний изоляции Монотерм А и Монотерм Б при неизменной напряженности переменного электрического поля E=15 МВ/м, частотой 50 Гц показали преимущество изоляции Монотерм Б с повышенным слюдяным барьером. Эффект увеличения времени до пробоя изоляции Монотерм Б объясняется, по-видимому, как увеличением содержания слюдяного барьера в изоляции, так и улучшением структуры изоляции, что показали результаты макроструктурных исследований срезов изоляции.

В АО “Электросила” создана методика функциональных испытаний высоковольтной изоляции на установке типа пазовой модели, позволяющей приблизить испытательные условия к эксплуатационным. Проведенные с помощью этой установки исследования выявили, что циклические напряжения в изоляции, вызываемые изменением температуры обмотки от нормальной до рабочей во время пусков и остановов электрической машины, являются одним из основных старящих факторов.

Программа термоциклических испытаний усовершенствованного варианта изоляции Монотерм на ленте Элмикатерм 55409 предполагала получение зависимости длительной электрической прочности от величины перепада температуры в изоляции при количестве термоциклов около 2200 и сравнение этих данных с аналогичной зависимостью для изоляции

Слюдотерм. Термоциклические испытания усовершенствованной изоляции Монотерм выполнены при значении перепада температуры в изоляции 30-35<sup>0</sup> С, 45-50<sup>0</sup> С.

Выполненные ранее исследования на изоляции Слюдотерм показали, что в оптимальном тепловом режиме пазовой модели (при токе в обмотке около 5000 А) величина перепада температуры в изоляции и деформации изоляции стержней зависит только от величины нагрева меди от начальной температуры до максимальной. Установлена зависимость перепада температуры  $\Delta\theta_{и}$  в изоляции ( $\Delta\theta_{и} = \theta_{м} - \theta_{и}$ ), между медью и сердечником ( $\Delta\theta_{мс} = \theta_{м} - \theta_{с}$ ) от изменения температуры под действием термоциклов ( $\Delta\theta_{м} = \theta_{м} - \theta_{о}$ ), где  $\theta_{м}$ ,  $\theta_{и}$  и  $\theta_{с}$  - абсолютные температуры меди, поверхности изоляции и сердечника,  $\theta_{о}$  - начальные температуры меди в <sup>0</sup> С. После воздействия 2200 термоциклов была определена длительная электрическая прочность изоляции всех испытывавшихся в пазовой модели стержней. При этом пробивные напряжения были определены без выемки стержней из пазовой модели.

Таблица 7

Сравнение длительной электрической прочности изоляции Монотерм до и после действия 2200 термоциклов с температурой перепада в изоляции

| Средняя толщина изоляции в группе, мм | Зона пробоя   | 50 % значение пробивных напряжений, кВ |  |  |
|---------------------------------------|---------------|--|--|--|
|                                       |               | Исходное состояние                     | $\Delta\theta_{и} = 30-35^0 \text{ С}$ | $\Delta\theta_{и} = 45-50^0 \text{ С}$ |
| 3,35                                  | мин. точки:   | 45                                     | 43                                     | 42                                     |
|                                       | пазовые части | 46                                     | 44                                     | 49                                     |
|                                       | зоны изгиба   | 45                                     | 44                                     | 44                                     |
| 3,85                                  | мин. точки:   | 50                                     | 49                                     |  |
|                                       | пазовые части | 48*                                    | 45*                                    | 50                                     |
|                                       | зоны изгиба   | 50-51*                                 | 49*                                    |  |

\* - значения, соответствующие 25% вероятности пробоя.

Данные о влиянии термоциклов на образцы изоляции Монотерм сведены в табл. 7. Видно, что длительная электрическая прочность образцов, подвергнутых термоциклическому старению с перепадом  $\Delta\theta_{и} = 30-35^0 \text{ С}$ , 45-50<sup>0</sup> С, практически совпала с исходной для обеих отличающихся по толщине групп изоляции. Можно заключить, что в пределах точности экспериментальных наблюдений тепловые циклы с перепадом 30-35<sup>0</sup> С, 45-50<sup>0</sup> С не приводят к износу изоляции Монотерм, тогда как у изоляции Слюдотерм происходит заметное старение в таких же условиях. Более высокая устойчивость изоляции Монотерм к термоциклам по сравнению со Слюдотермом, по-видимому, объясняется большей монолитностью изоляции Монотерм, что подтверждается результатами измерений интенсивности ч.р. Это же подтверждается при рассмотрении каналов пробоев, которые во всех случаях проходили почти перпендикулярно слоям катушки, не распространяясь вдоль слоев, как это часто имеет место.

**Глава 7. Исследование физико-механических и адгезионных свойств изоляции Монотерм.** В генераторах с воздушным охлаждением влияние температуры является основным фактором старения изоляции. Повышение температуры гораздо сильнее влияет на механическую, чем на электрическую прочность изоляции крупных электрических машин. Имеются экспериментальные данные, показывающие, что в условиях совмещенного действия тепловой и механических нагрузок температура гораздо сильнее влияет на усталость изоляции при деформациях изгиба, чем на длительную электрическую прочность. Старение изоляции при циклическом действии деформаций на изгиб при высокой температуре зависит в основном от

прочности связи между связующим и слюдяной бумагой при различной температуре. Температура оказывает большое влияние на прочность связи, поскольку свойства связующего имеют в этом случае решающее значение. Длительная электрическая прочность слюдяной изоляции, как показано при испытании изоляции Монотерм на ленте Элмикатерм 55409, определяется содержанием слюды, а не свойствами связующего. Влияние температуры на механические свойства изоляции Монотерм было изучено на плоских образцах, вырезанных из стержней макетов, изготовленных на ленте Элмикатерм 55409 гидростатическим способом. Результаты механических испытаний показали: значения  $\tau_p$ ,  $\tau_{сж}$  и  $\tau_{сд}$  изоляции Монотерм значительно превышают аналогичный показатель для базовой изоляции Слюдотерм; для изоляции Монотерм отсутствует характерное для изоляции Слюдотерм снижение прочностных свойств при повышении температуры до рабочих ( $155^\circ\text{C}$ ); снижение модуля упругости при растяжении составило для Монотерм при  $130^\circ\text{C}$  41% ( $E_{20^\circ\text{C}}=3,06 \cdot 10^4 \text{ МПа}$  и  $E_{130^\circ\text{C}}=1,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ), для Слюдотерм – почти на порядок ( $E_{20^\circ\text{C}}=2,06 \text{ МПа}$  и  $E_{130^\circ\text{C}}=0,22 \text{ МПа}$ ). Различие в механических свойствах изоляций, особенно при повышении температуры, объясняется высокой термостойкостью эпоксиноволачного связующего в ленте Элмикатерм 55409.

Для обоих видов изоляции Монотерм и Слюдотерм были сняты температурные зависимости модуля упругости при растяжении. Полученная зависимость свойственна для сшитых полимеров и имеет три характерные области: область стеклообразного состояния и отсутствие вязкоупругости до  $60^\circ\text{C}$  для Слюдотерм и до  $150^\circ\text{C}$  для Монотерм; переходная область в диапазоне  $60\text{-}110^\circ\text{C}$  для Слюдотерм,  $120\text{-}170^\circ\text{C}$  для Монотерм и область высокоэластичного состояния при температуре свыше  $100^\circ\text{C}$  для Слюдотерм, свыше  $170^\circ\text{C}$  для Монотерм. Для Слюдотерм три переходные области более ярко выражены, чем для Монотерм, что косвенно свидетельствует о том, что изоляция Слюдотерм имеет более редкую пространственную сетку, чем Монотерм. Для Слюдотерм значение модуля упругости снижалось в несколько раз в диапазоне от  $40^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ , а для Монотерм – на 20-30% при более высокой температуре в интервале  $120\text{-}170^\circ\text{C}$ . На основе термомеханического анализа по зависимости  $\epsilon - T$  была определена температура стеклования изоляции Монотерм (табл. 8). Следует отметить, что  $T_g$  эпоксиноволачного связующего, определенная методом ДСК, близко совпадает с данными, полученными по термомеханическому анализу. Это свидетельствует о хорошей воспроизводимости разных методов.

Таблица 8

Влияние параметров термообработки на характеристики изоляции Монотерм

| Температура отверждения, $^\circ\text{C}$ | Время отверждения, ч | Температура стеклования, $^\circ\text{C}$ | $E_{изг}$ , $10^4 \cdot \text{МПа}$ |
|---|----------------------|---|-------------------------------------|
| 160                                       | 4                    | 102                                       | 3,4                                 |
|   | 5                    | 107                                       | 4,7                                 |
|   | 17                   | 107                                       | 4,7                                 |
| 180                                       | 2                    | 114                                       | 4,7                                 |
|   | 4                    | 124                                       | 7,6                                 |
|   | 6                    | 126                                       | 11,5                                |

Наиболее опасным и неустраняемым дефектом корпусной изоляции, возникающим после термопрессования, является отслоение изоляции от токоведущей части. В таких стержнях отмечается наиболее высокий уровень частичных разрядов. Основными факторами, определяющими вероятность возникновения отслоений, являются: режимы термопрессования и конструкция граничного слоя между проводником и корпусной изоляцией. В связи с этим

необходимо было оценить адгезионной прочности вариантов изоляции к полупроводящему материалу, который накладывается на токоведущую часть в качестве первого слоя, в данном случае к ленте ЛСЭПП-60 на основе пропитанной стеклоткани эпоксифенольным связующим с сажевым наполнителем. Температурная зависимость адгезионной прочности, определенная по сопротивлению сдвига между слоями изоляции ( $\tau_{сд}$ ), показала: адгезионная прочность изоляции Монотерм ( $\tau_{сд20^{\circ}\text{C}}=20,9\text{МПа}$ ) выше, чем для Слюдотерм ( $\tau_{сд20^{\circ}\text{C}}=18,5\text{МПа}$ ); при температуре испытаний  $100^{\circ}\text{C}$   $\tau_{сд}=14,8\text{МПа}$  для Монотерм,  $\tau_{сд}=10\text{МПа}$  для Слюдотерм. Снижение адгезионной прочности при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  для Монотерм составило 29%, для Слюдотерм – 46%. Для изоляции Слюдотерм характерно резкое снижение механических и адгезионных свойств с ростом температуры, что связано с меньшей нагревостойкостью связующего. Изоляция Монотерм имеет высокую стабильность механических характеристик в широком интервале температур, включая и рабочие ( $155^{\circ}\text{C}$ ).

Несмотря на высокую устойчивость изоляции Монотерм к механическим воздействиям, особенно при высоких температурах, изоляция на эпоксиноволачном связующем менее стойка к знакопеременным нагрузкам. Это различие вполне соответствует представлениям о внутренних термомеханических напряжениях: в быстроотверждающейся изоляции Монотерм они больше, чем в изоляции Слюдотерм. Для выяснения этого вопроса был поставлен следующий эксперимент. Две группы образцов (Монотерм и Слюдотерм) по 15 стержней в каждой подвергались вибрации ( $\varphi=0,5\cdot 10^{-3}$ ). Число циклов вибраций было принято 1 млн. Затем эти образцы старились до пробоя под действием электрического поля на воздухе напряженностью  $15\text{МВ/м}$ , частотой  $50\text{Гц}$ . Основываясь на данных о том, что такой уровень деформации не вызывает излома кривой жизни, по 50%-ным значениям распределения времени до пробоя построили кривые жизни с показателем наклона  $n=13$ . Для сравнения были использованы кривые жизни в исходном состоянии. После вибраций снижение ДЭП составило 7% для обеих видов изоляции.

#### **Основные результаты и выводы:**

1. Впервые на основании проведенных исследований поляризации пленки полиэтилентерефталата в плазме тлеющего разряда и между термически напыленными на обе поверхности образца электродами показано, что инжекция электронов из катода в поверхностные слои пленки и их локализация на ловушках, наблюдаются даже в отсутствие частичных разрядов.
2. Экспериментально показано, что захваченные на ловушках электроны могут переходить на соседние локализованные состояния за счет прыжкового механизма. С ростом температуры увеличивается частота прыжков, что приводит к росту проводимости пленки.
3. Показано, что основная доля структурных ловушек в пленке полиэтилентерефталата связана с существованием кристаллической фазы в ее объеме. Концентрация структурных ловушек высока в локальных областях на поверхности кристаллитов и низка в остальной части объема пленки, что должно приводить к неравномерному распределению гомозаряда в поверхностном слое пленки и образованию локальных областей перенапряжения, характеризующихся высоким значением электрического поля, значительно превышающим среднее поле по всем полимере.

4. Показано, что проводимость стеклоткани и слюдяной бумаги, пропитанных эпоксиноволачным связующим лаком, связана с процессами транспорта отрицательных ионов в связующем.
5. На основании проведенных исследований установлено, что в пленке полиэтилентерефталата, включенной в состав композиционного слюдяного материала в качестве центрального слоя, не возможна электронная поляризация, которая является причиной накопления гомозаряда в ее объеме. Таким образом, в композиционном материале наблюдается изоляция пленки полиэтилентерефталата от металлических электродов слоями диэлектрика, в котором отсутствует электронный транспорт в температурном интервале от 20°C до 200°C, что должно приводить к увеличению времени до пробоя данного композиционного материала в электрическом поле и, соответственно, к уменьшению вероятности пробоя по сравнению с композиционным материалом без пленки.
6. Экспериментальные результаты, полученные при функциональных испытаниях плоских образцов и систем изоляции на натуральных катушках, изготовленных на слюдяных лентах с пленкой и без пленки, указывают на эффект повышения электрической прочности изоляции при введении пленки полиэтилентерефталата в композиционный материал.
7. Обработка экспериментальных данных по электрическому старению композиционных материалов, не содержащих и содержащих пленку полиэтилентерефталата, включенную в состав композита в качестве центрального слоя, с помощью трёхпараметрического распределения Вейбулла, показала значительное увеличение среднего времени до пробоя и начального значения времени, в течение которого вероятность пробоя равна нулю, для материала с пленкой.
8. Впервые дано теоретическое обоснование эффекту повышения электрической прочности изоляции, содержащей пленку полиэтилентерефталата. Показано, что включение пленки даже в композиционный материал, в объеме которого, из-за присутствия микродефектов в виде полостей, в сильном электрическом поле возможно развитие объемных разрядных процессов, приводит к значительному росту среднего времени до пробоя материала и начального значения времени, в течение которого вероятность пробоя равна нулю.
9. Теоретическое и экспериментальное обоснование эффекта повышения электрической прочности композиционного слюдяного материала при введении в его состав пленки полиэтилентерефталата доказывает необходимость широкого внедрения слюдяных лент с пленочной подложкой для повышения надежности изоляции крупных электрических машин.
10. На основании исследований модифицированного эпоксиноволачного связующего разработана рецептура приготовления лака, используемого для пропитки предварительно пропитанной ленты. Исследование кинетики отверждения не модифицированного и модифицированного эпоксиноволачного связующего позволило дать обоснованную технологию предварительной и конечной стадии прессования изоляции стержней турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электродвигателей.
11. Впервые разработана лента на утолщенной слюдобумаге, пропитанной эпоксиноволачным связующим и внедрена система изоляции с повышенной нагревостойкостью и содержанием слюдобарьера. Создана новая изоляционная система Монотерм для турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электродвигателей, обеспечивающая, как показали сравнительные испытания двух систем изоляции на макетах и натуральных стержнях, более высокую

надежность по сравнению с базовой изоляцией Слюдотерм по электрическим, физико-механическим, термомеханическим и адгезионным свойствам.

12. Полученные результаты позволяют сделать прогноз на направления дальнейшей работы по улучшению характеристик композиционной изоляции высоковольтных электрических машин. Среди них можно выделить следующие: повышение адгезии к связующему отдельных компонентов композита; разработка технологии изготовления изоляции, устраняющей наличие микрополостей в связующем; использование других полимерных пленок в качестве центрального слоя в слюдяных композиционных материалах.
13. Предварительно пропитанные ленты с пленкой ЛСМ и ЛСУ и без пленки Элмикатерм 55409, разработанные в диссертационной работе, в настоящее время широко применяются в АО «Электросила» (г. Санкт-Петербург), АО «Уралэлектротяжмаш» (г. Екатеринбург), АО «Привод» (г. Лысьва, Пермская область) при выпуске мощных и сверхмощных турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электродвигателей (подробно в приложении диссертации).

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Электроизоляционные ленты на основе полиимидной пленки для высоконагревостойкой системы изоляции / Ю.М. Украинский, В.М. Пак, Б.Е. Рыбалко, В.А. Сорокин // Электротехника.- 1997. №5, С. 27-31.
2. Разработка и исследование термореактивной системы изоляции высоковольтных электрических машин / Е.И. Ярошня, В.М. Пак, Н.С. Окнин, Ж.П. Погодина // Электротехника.- 1997. № 12, С. 40-45.
3. Пак В.М., Украинский Ю.М. Создание современных электроизоляционных материалов и систем изоляции для тяговых электродвигателей нового поколения электровозов // Электротехника.- 1999. № 3, С. 53-55.
4. Мелешенко В.Н., Пак В.М. Опыт применения обмоточного провода со слюдосодержащей изоляцией // Электротехника.- 1999. № 3, С. 56-58.
5. Усовершенствованная высоковольтная изоляция обмоток мощных турбо-, гидрогенераторов из лент на основе бумаг новой структуры / Т.А. Гуреева, З.В. Щербакова, В.М. Пак и др. // Тезисы докладов I Международной конференции по электромеханике и электротехнологии, 13-16 сентября, 1994, Суздаль, С. 33.
6. Новая слюдопластовая лента для изоляции статорных обмоток электрических машин и трансформаторов / В.М. Пак, А.П. Степанович, В.Н. Шамрай, Л.Н. Федоров // Тезисы докладов II Международной конференции по электромеханике и электротехнологии, 1-5 октября. 1996, Крым, С. 27-30.
7. Пак В.М., Папков А.В., Лучко Д.В. Новые электроизоляционные слюдосодержащие материалы // Тезисы докладов IV симпозиума “Электротехника-2010”, 20-23мая, 1997, Москва, С. 181-182.
8. Композиционные материалы на основе полиимидных пленок для высоконагревостойких систем изоляции / Ю.М. Украинский, В.М. Пак, Б.Е. Рыбалко, В.А. Сорокин // Тезисы докладов II Международной конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава», 4-6 июня, 1997, Новочеркасск, С. 185-186.
9. Композиционные материалы для изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин / Н.Н. Ваксер, И.Е. Куимов, В.М. Пак, В.В. Старовойтенков // Труды Международной

- научно-технической конференции «Изоляция-99», 15-18 июня, 1999, Санкт-Петербург, С. 117-118.
10. Украинский Ю.М., Пак В.М., Куимов И.Е. Создание и внедрение нагревостойких электроизоляционных материалов и систем изоляции для тяговых электродвигателей нового поколения электровозов // Труды Всероссийского электротехнического конгресса с международным участием «ВЭЛК-99», 28 июня- 3 июля, 1999, Москва, С. 451-452.
  11. Современные тенденции развития производства электроизоляционных материалов для изоляции обмоток высоковольтных электрических машин / И.Е. Куимов, В.М. Пак, А.А. Папков, Л.Н. Федоров // Труды Всероссийского электротехнического конгресса с международным участием «ВЭЛК-99», 28 июня - 3 июля, 1999, Москва, С. 452-453.
  12. Композиционные материалы на основе слюдопластовой бумаги и полимерной пленки / А.М. Андреев, Н.М. Ваксер, И.Е. Куимов, В.М. Пак и др. // Электротехника.- 2000. №6, С. 44-47.
  13. Модификация полимерной пленки из полиэтилентерефталата с использованием тлеющего низкочастотного разряда / И.Е. Кардаш, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.И. Драчев и др. // Электротехника.- 2000. №12, С. 53-58.
  14. Kuimov I.E., Pak W.M. Current Trends of Production Development as Regards to the Electrical Insulation Materials for HV Electrical Machines Winding Insulation: Test Results on Long-Term Electrical strength // Conference record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2-5 April, 2000, Anaheim, California, USA. Chelsea: Sheridan Books, 2000.- P. 532-534.
  15. Куимов И.Е., Пак В.М. Новые слюдобумажные ленты для изоляции высоковольтных вращающихся машин // III Симпозиум «Электрические машины в новом столетии», 9-12 октября 2000, Москва, С. 126-129.
  16. Электрическая прочность композиционных слюдопластовых материалов / И.Е. Куимов, Н.М. Ваксер, М.А. Лаврентьева, В.М. Пак и др. // Девятая международная конференция «Физика диэлектриков», 17-22 сентября, 2000, Санкт-Петербург, Спб.: Изд-во РГПУ им.А.И.Герцена, том II, С.113.
  17. Куимов И.Е., Папков А.В., Пак В.М. Перспективы создания и внедрения новых электроизоляционных материалов // Электротехника. - 2001. №6, С. 5-10.
  18. Пак В.М. Успехи в создании и применении композиционных материалов на основе полимерной пленки для изоляции вращающихся электрических машин // Электротехника. - 2001. №6, С. 15-21.
  19. Усовершенствованная система изоляции монотерм обмоток турбо-, гидрогенераторов / Т.А. Гуреева, В.В. Петров, Ж.П. Погодина, В.М. Пак // Электротехника. - 2001. №6, С. 22-29.
  20. Пак В.М., Аснович Л.З. Ремонтпригодная терморезистивная изоляция катушечных обмоток электродвигателей // Электротехника. - 2001. №6, С. 31-37.
  21. Оценка надежности изоляционных систем на основе полиимидных пленок отечественного производства и фирмы «Дюпон де Немур» / Н.И. Березинец, Ю.М. Украинский, Б.Е. Рыбалко, В.М. Пак // Электротехника. - 2001. №6, С. 37-39.
  22. Образование зарядовых состояний в пленках из полиэтилентерефталата, модифицированных в плазме тлеющего низкочастотного разряда / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А. Кузнецов // Электротехника. - 2001. №6, С. 46-51.
  23. Образование зарядных состояний в пленках из полиэтилентерефталата, модифицированных в плазме тлеющего низкочастотного разряда / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А.

- Кузнецов // Труды IV Международной конференции “Физико-технические проблемы электротехнических материалов и компонентов”, 24-27 сентября, 2001, Москва, С.73-75.
24. Пак В.М. Успехи в создании и применении композиционных материалов на основе полимерной пленки для изоляции вращающихся электрических машин // Тезисы докладов VI симпозиума “Электротехника 2010”, 22-26 октября, 2001, Москва, С. 33-37.
25. Куимов И.Е., Папков А.В., Пак В.М. Перспективы создания и внедрения новых электроизоляционных материалов // Тезисы докладов VI симпозиума “Электротехника 2010”, 22-26 октября, 2001, Москва, С. 37-42.
26. Emergence of discharges in polyester films in plasma of LF glow discharge / A.I. Drachev., V.M. Pak, A.B. Gilman, A.A. Kuznetsov, Kardash I.E.// Electrical Insulation Conference 2001, October 15-18, Cincinnati, Ohio, USA.
27. Study of Electroinsulation Materials Combined of Mica Paper and polymer film for application in HV Rotating electrical machines / Andreyev A.M., Vakser N.M., Kuimov I.E., Lavrentieva M.A., Pak V.M., Starovoitenkov V.V.// Electrical Insulation Conference 2001, October 15-18, Cincinnati, Ohio, USA.
28. Образование зарядовых состояний в пленках из полиэтилентерефталата, модифицированных в плазме тлеющего низкочастотного разряда / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А. Кузнецов // Тезисы докладов I Всероссийской конференции по прикладной химии высоких энергий, ноябрь, 2001, Москва, С. 97-98.
29. Воздействие тлеющего низкочастотного разряда на пленки полиэтилентерефталата / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А. Кузнецов // Химия высоких энергий. 2002. Т.36. № 2. С. 143-147.
30. Влияние обработки в разряде на диэлектрические свойства пленки ПЭТ-Э / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А. Кузнецов // Электротехника. № 4, 2002, С.17-20.
31. Изучение объемно-зарядовых процессов в отдельных компонентах многослойного электроизоляционного материала, протекающих под действием электрического поля / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А. Кузнецов // Электротехника. № 4, 2002, С. 20-26.
32. Объемно-зарядовые процессы, протекающие под действием электрического поля в многослойном материале с пленкой ПЭТ-Э / А.И. Драчев, В.М. Пак, А.Б. Гильман, А.А. Кузнецов // Электротехника. № 4, 2002, С.26-29.
33. Сравнительный анализ результатов применения лент Элмикапор в системах изоляции / А.М. Андреев, М.А. Лаврентьева, В.М. Пак, В.В. Старовойтенков // Электротехника. № 4, 2002, С.29-32.
34. The Influence of LF Glow Discharge Treatment on the Dielectric Properties of PET Film / A. Drachev, V. Pak, A. Gilman, A. Kuznetsov // Conference record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 7-10 April, 2002, Boston, Massachusetts, USA.