Азизов Андрей Шавкатович. Исследование и разработка современных систем изоляции статорных обмоток высоковольтных турбо- и гидрогенераторов повышенной мощности : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.02 / Азизов Андрей Шавкатович; [Место защиты: С.-Петерб. политехн. ун-т].- Санкт-Петербург, 2009.- 160 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-5/830

**Содержание к диссертации**

Введение

**Глава 1. Литературный обзор 13**

1.1. Состав корпусной изоляции статорной обмотки турбо- и гидрогенераторов 13

1.2. Технология изготовления корпусной изоляции 16

1.2.1. Технология изготовления корпусной изоляции с использованием предварительно пропитанных лент 18

1.2.2. Технология изготовления корпусной изоляции с использованием непропитанных (сухих) лент 23

1.3. Усовершенствование изоляции статорной обмотки мощных турбо- и гидрогенераторов 27

1.3.1. Вопросы создания высокотеплопроводной изоляции для турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением 28

1.3.2. Вопросы создания корпусной изоляции с низким значением диэлектрических потерь для мощных гидрогенераторов 44

1.4. Надежность изоляции статорной обмотки высоковольтных турбо- и гидрогенераторов 48

1.4.1. Воздействие электрического поля 50

1.4.2. Воздействие тепловых факторов 54

1.4.3. Воздействие механических факторов 57

1.4.4. Влияние окружающей среды 60

1.4.5. Комплексное воздействие разрушающих факторов на изоляцию электрических машин 63

1.4.5. Выводы по литературному обзору и постановка цели исследований

**Глава 2. Методическая часть 65**

2.1. Конструкции образцов изоляции статорной обмотки 65

2.2. Методики измерения электрических свойств корпусной изоляции 67

2.2.1. Методика определения tg5 образцов изоляции высоковольтных электрических машин 67

2.2.2. Определение длительной электрической прочности макетных образцов изоляции 71

2.2.3. Методика статистической обработки результатов оценки длительной электрической прочности 73

2.2.4. Методика измерения характеристик частичных разрядов в электромашинной изоляции 76

2.2.5. Определение устойчивости статорной изоляции к воздействию термоциклов 79

2.3. Измерение физико-химических характеристик корпусной изоляции 79

2.3.1. Методика определения содержания связующего (Ссв) 79

2.3.2. Методика измерения коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции 80

2.4. Общие вопросы методики постановки исследования 85

2.5. Выводы по методической части 86

**Глава 3. Разработка корпусной изоляции с улучшенными диэлектрическими свойствами для высоковольтных гидрогенераторов с воздушным охлаждением 93**

3.1. Характеристики исследованных предварительно пропитанных слюдосодержащих лент промышленного производства 93

3.2. Разработка предварительно-пропитанной изоляционной ленты отечественного производства с низким значением диэлектрических потерь при максимальных рабочих температурах 93

3.3. Исследование диэлектрических потерь образцов корпусной изоляции на основе предварительно пропитанных слюдосодержащих лент 93

3.4. Экспериментальная оценка длительной электрической прочности корпусной изоляции с улучшенными диэлектрическими параметрами 103

3.5. Исследование стойкости изоляции с улучшенными диэлектрическими характеристиками к воздействию напряжения и термоциклов 108

**Глава 4. Разработка корпусной изоляции с повышенной теплопроводностью для мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением 114**

4.1. Характеристика исследованных материалов. Методика изготовления образцов для проведения теплофизических экспериментов 115

4.2. Результаты определения коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции, изготовленных из различных слюдосодержащих лент 118

4.3. Исследование теплопроводности материалов для пазового уплотнения статорной обмотки турбогенераторов с воздушным охлаждением 126

4.4. Выбор технологического режима изготовления корпусной изоляции мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением 130

4.5. Исследование и выбор материалов для системы корпусной изоляции мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением 133

4.6. Испытание изоляции обмотки статора турбогенератора ТЗФП-220 с воздушным охлаждением мощностью 220 МВт и контроль качества пропитки статорной обмотки 142

Основные выводы и результаты работы 148

Литература 150

Приложение. Акт внедрения результатов работы 160

* [Вопросы создания высокотеплопроводной изоляции для турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/issledovanie-i-razrabotka-sovremennyh-sistem-izoljacii-statornyh-obmotok.html#3966861)
* [Методика измерения коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/issledovanie-i-razrabotka-sovremennyh-sistem-izoljacii-statornyh-obmotok.html#3966862)
* [Исследование диэлектрических потерь образцов корпусной изоляции на основе предварительно пропитанных слюдосодержащих лент](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/issledovanie-i-razrabotka-sovremennyh-sistem-izoljacii-statornyh-obmotok.html#3966863)
* [Результаты определения коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции, изготовленных из различных слюдосодержащих лент](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/issledovanie-i-razrabotka-sovremennyh-sistem-izoljacii-statornyh-obmotok.html#3966864)

**Введение к работе**

Актуальность работы. Совершенствование, а именно, придание заданных электрофизических свойств, определяемых техническим прогрессом в энергетике, изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин осуществляется как путем разработки и внедрения новых изоляционных материалов - предварительно пропитанных и непропитанных («сухих») слюдосодержащих лент с улучшенными характеристиками входящих в их состав компонентов (слюдобумаги, стеклотканевой подложки и связующего - пропиточного состава), так и с помощью оптимизации технологического процесса изготовления системы корпусной изоляции.

Возрастающие требования минимизации диэлектрических потерь статорной изоляции современных гидрогенераторов привели к необходимости снижения диэлектрических потерь изоляции, особенно в области максимальных рабочих температур. В частности, при проведении международных конкурсов (тендеров) на изготовление современных гидрогенераторов требования по минимальным значениям тангенса угла диэлектрических потерь корпусной изоляции при температуре 155 С не превышают 10 %. Разработка системы изоляции, характеризующейся пониженными диэлектрическими потерями в области рабочих температур, позволит повысить рабочие характеристики и надежность мощных высоковольтных гидрогенераторов.

Создание и внедрение в производство электроизоляционных материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, позволит осуществить разработку нового типа теплопроводной корпусной изоляции, что, в свою очередь, увеличит диапазон мощности турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением.

Несмотря на достаточно высокие научно-технические достижения отечественного производства в области создания высоконадежной изоляции статорных обмоток крупных высоковольтных электрических машин (турбо- и гидрогенераторов), вопросы, связанные с разработкой и изготовлением новых типов корпусной изоляции с повышенными значениями теплопроводности и низким тангенсом угла диэлектрических потерь при максимальной температуре требуют дополнительной научной проработки.

Цель работы. На основе всесторонних исследований диэлектрических характеристик, теплопроводности и механизмов старения термореактивной слюдосодержащей электромашинной изоляции выработать рекомендации по созданию новых электроизоляционных материалов с улучшенными диэлектрическими параметрами (с пониженным значением тангенса угла диэлектрических потерь при максимальной рабочей температуре), а также с высоким значением коэффициента теплопроводности. Разработать и внедрить технологические процессы по созданию новых типов корпусной изоляции:

с пониженными диэлектрическими потерями для мощных гидрогенераторов;

с повышенной теплопроводностью и электрической прочностью для мощных турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением.

Для достижения указанной цели представляется необходимым решить следующие задачи:

1. Разработать комплексную экспериментальную методику, обеспечивающую объективную экспериментальную оценку диэлектрических параметров корпусной изоляции при разных эксплуатационных воздействиях.

1. Изучить влияние структурных особенностей и химического строения слюдосодержа-щих композиционных материалов на диэлектрические и теплофизическпе характеристики системы корпусной изоляции.
2. Разработать основные параметры технологических процессов, предназначенных для создания корпусной изоляции с улучшенными характеристиками для мощных высоковольтных гидрогенераторов и турбогенераторов с воздушным охлаждением.

Научная новизна работы.

1. Разработана комплексная экспериментальная методика, основанная на использовании модельных, макетных испытательных образцов и элементов реальных обмоток, а также на последовательном применении серии традиционных и новых, предложенных в работе тестовых методов, при помощи которых выполнено систематическое изучение процессов старения различных типов термореактивной слюдосодержащей изоляции.
2. Установлено влияние химического строения пропитывающего лака, используемого для изготовления предварительно пропитанных слюдосодержащих лент, на значение тангенса угла диэлектрических потерь корпусной изоляции при максимальных рабочих температурах.
3. Экспериментально установлена взаимосвязь коэффициента теплопроводности корпусной изоляции высоковольтных турбо- и гидрогенераторов, изготовленной по разным технологиям (гидростатической опрессовкой и вакуум-нагнетательной пропиткой), от содержания эпоксидного связующего.
4. Показано влияние структурных особенностей и состава композиционной электромашинной изоляции (типа и толщины стеклянной подложки, типа эпоксидного связующего и мелкодисперсного твердого наполнителя) на ее теплофизическпе и диэлектрические характеристики.

Практическая значимость работы.

1. Разработана достоверная, экономически доступная и удобная в применении, в том числе в промышленных условиях, комплексная экспериментальная методика выбора электроизоляционных материалов для создания электромашинной изоляции с заданными электрическими и теплофизическими свойствами.
2. Совместно с ОАО «ХК Элинар» разработан, исследован и внедрен в производство в ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» электроизоляционный слюдосодержащий материал (Элмикатерм 52409) с улучшенными электрическими свойствами, с применением которого разработана и внедрена в ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» технология изготовления корпусной изоляции с пониженными диэлектрическими потерями для мощных гидрогенераторов с воздушным охлаждением.
3. Исследованы и внедрены в производство в ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» электроизоляционные слюдосодержащие материалы с оптимизированной структурой (Porofab МЕ3434, Элмикатерм Т), предназначенные для создания высокотеплопроводя-щей изоляции статорной обмотки. Разработана и внедрена технология изготовления высокотеплопроводной изоляции статорной обмотки для турбогенераторов с воздушным охлаждением мощностью 220 МВт.
4. Изготовленные с использованием результатов, достигнутых в настоящей работе, головные образцы электрических машин с изоляцией, имеющей улучшенные характеристики (гидрогенератор СВ 1182/300-48Т (395/438,6 МВА, 17 кВ) для ГЭС «Эль-Кахон» (Мексика) и

турбогенератор с воздушным охлаждением ТЗФП-220 для Красноярской ТЭЦ), укрепили конкурентоспособность продукции ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» (г. Санкт-Петербург). Практическая значимость полученных результатов подтверждена актом внедрения их в ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» (г. Санкт-Петербург).

На защиту выносятся:

(.Результаты исследований электрических *и*теплофизических характеристик различных типов термореактивной слюдосодсржащеи электромашинной изоляции, изготовленных методом гидростатической опрессовки и вакуум-нагнетательной пропитки.

1. Принципы выбора электроизоляционных материалов, конструкция и технология изготовления корпусной изоляции с пониженным значением диэлектрических потерь для мощных гидрогенераторов.
2. Принципы выбора электроизоляционных материалов, конструкция и технология изготовления корпусной изоляции с повышенной теплопроводностью для мощных турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением.

Достоверность результатов. Достоверность обеспечивается обоснованным выбором и корректным использованием современных методов измерения электрических и теплофизических характеристик исследуемых материалов; применением современных методик, позволяющих всесторонне изучить проблему; статистической обработкой полученных данных; проведением повторных испытаний, включающих испытания на полномасштабных образцах статорных обмоток, показывающих воспроизводимость результатов.

Личный вклад автора состоит в определении цели и методов исследования; проведении экспериментальных исследований; обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор благодарит за помощь в проведении исследований сотрудников лаборатории электрической изоляции ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» (г. Санкт-Петербург).

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Научно-практическая конференция «Полимерные материалы, композиты и изделия из них», 13.10 -14.10.2005, Санкт-Петербург.
2. Четвертая международная научно-техническая конференция «Электрическая изоля-ция-2006», 16.05-19.05.2006, Санкт-Петербург.
3. 10'h INSUCON International Conference, 24.05-26.05.2006, Birmingham, UK.
4. Научно-практическая конференция «Перспективные электроизоляционные материалы и системы изоляции вращающихся электрических машин», 25.04-27.04.2007, г. Наро-Фоминск.
5. C1GRE SC A1&D1 Joint Colloquium, 24.10-27.10.2007, Korea.
6. XI Международная конференция Физика диэлектриков (Диэлектрики-2008), 03.06-07.06.2008, Санкт-Петербург.
7. VII Международной конференции «Электроизоляционные материалы для вращающихся электрических машин», 09.06-11.06.2009, г. Наро-Фоминск.
8. XIII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», 18.05.2009, Санкт-Петербург.

9. VII Международная научно-техническая конференция «Элмаш-2009», 22.09-25.09.2009, г. Истра.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 работы в журналах, входящих в список ВАК.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация общим объёмом 160 страниц состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (105 наименование), приложения. Работа содержит 72 рисунка, 34 таблицы.

## Вопросы создания высокотеплопроводной изоляции для турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением

Широкое развитие в последние десятилетия получили в энергетике газотурбинные и парогазовые установки, более экономичные, чем паротурбинные. Турбогенераторы для этих установок должны быть высокоманевренными и простыми в обслуживании. Конструкция такой комплексной системы должна быть простой, обладать улучшенной системой управления, низкой стоимостью эксплуатации, а также коротким периодом конструирования и запуска серии в эксплуатацию. Обязательным требованием является и обеспечение высокой надежности. Подобные требования вызваны жесткими условиями работы генератора с газовой турбиной, для которых характерны частые циклы «останова/пуска» с последующим быстрым выходом на полную нагрузку. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют турбогенераторы с воздушным охлаждением [20-23, 39], которые в последние годы широко используются в мировой энергетике. Увеличение эффективности работы таких комплексов, в частности, может быть достигнуто за счет роста мощности генераторов с большими и длинными статорными катушками.

Как отмечалось ранее, в Европейском сообществе к участию в тендерах на электрооборудование мощностью до 300 МВт допускаются только турбогенераторы с воздушным охлаждением. Данные, показывающие динамику изменения максимальной мощности промышленно выпускаемых турбогенераторов с воздушным охлаждением, представлены на рис. 1.10 [20]. Как видно, за последние двадцать лет мощность таких турбогенераторов увеличалась с 200 МВА до 400 МВА. Следует отметить, что мировыми лидерами в этой области являются такие известные фирмы, как Alstom (Франция), Hitachi (Япония) и другие [21-23]. Максимальная мощность турбогенераторов с воздушным охлаждением отечественного производства до настоящее времени была ограничена величиной 160 МВт.

Увеличение мощности турбогенераторов с воздушным охлаждением в основном ограничивается предельно допустимым током обмоток статора.

При этом тепло, генерируемое в проводниках, передается через стенки корпусной изоляции, являющейся тепловым барьером, ввиду существенно более низкого значения коэффициента теплопроводности (X) современной слюдосодержащей изоляции по сравнению с материалами статора и проводника. Значения коэффициента теплопроводности современной слюдосодержащей изоляции лежат в интервале от 0,25 до 0,27 Вт/(м-К), тогда как соответствующие величины для меди и стали превышают их в 1500 и 300 раз соответственно (рис. 1.11). В результате, слюдосодержащая изоляция действует как тепловой барьер, ограничивая эффективность системы охлаждения и, как следствие, ограничивает допустимую удельную мощность электрической машины.

Необходимость создания мощных турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением потребовала создания систем изоляции с улученными теплопередающими свойствами. Существует несколько основных способов улучшения теплопередачи в системе статорной обмотки:

- уменьшение толщины корпусной изоляции;

- увеличение допустимой рабочей температуры корпусной изоляции;

- увеличение коэффициента теплопроводности корпусной изоляции.

Первый способ требует существенного увеличения достигнутого уровня длительной электрической прочности корпусной изоляции, что в обозримом будущем практически невозможно, в виду оптимального (с точки зрения содержания слюды) состава используемых современных слюдопластовых лент. В настоящее время подтвержденная в литературе допустимая рабочая напряженность электрического поля корпусной изоляции (в области плоской стороны стержня) может достигать значений (3,0-3,2) кВ/мм для изоляции, изготовленной методом ВНП, для проводников с оптимизированной геометрией (с закругленными углами) [4]. Дальнейшее увеличение рабочей напряженности и связанное с этим утонение изоляции может привести наряду с проблемами электрического старения, к существенному снижению механических характеристик корпусной изоляции и усложнению проблемы нанесения про-тивокоронного покрытия, что неизбежно негативно скажется при монтаже обмотки.

Для реализации второго способа повышения теплопередачи необходимо применение изоляционных материалов с более высоким классом нагрево-стойкости, чем класс F, что сопровождается определенными сложностями в настоящее время.

Путь, связанный с применением корпусной изоляции, обладающей повышенной теплопроводностью, по сравнению с традиционно применяемыми в настоящее время типами изоляции, наиболее реалистичен.

Следовательно, для разработки конструкции и изготовления конкурентоспособных мощных турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением требуется обоснованный выбор электроизоляционных материалов (слюдосодержащих лент, связующих и материалов для пазового уплотнения), характеризующихся высоким значением коэффициента теплопроводности, для создания нового типа корпусной изоляции.

В настоящее время в мировой практике реализуются следующие направления по повышению теплопроводности корпусной слюдосодержащей изоляции:

- оптимизация структуры и состава изоляционных лент;

- создание наполненных изоляционных лент;

- применение высокотеплопроводного связующего.

Основная цель оптимизации состава слюдопластовых изоляционных лент - создание композиции с максимальным относительным содержанием компонентов с наибольшим значением коэффициента теплопроводности (X) и соответственно с минимальным содержанием компонентов с наименьшим значением X. При этом технологические и электрические свойства ленты не должны ухудшаться. Как видно из таблицы 1.3, минимальным значением X в составе изоляционной ленты обладает эпоксидный компаунд.

Следовательно, снижение содержания эпоксидного компаунда приведет к повышению величины X и также должно привести к улучшению электрических характеристик корпусной изоляции.

В исследованиях [25, 26] проведен теоретический анализ изменения X от содержания компонентов слюдосодержащей корпусной изоляции, изготовленной методом полной ВНП. Для расчета значений X изоляции использовались эквивалентные тепловые схемы замещения корпусной изоляции в поперечном и продольном направлениях. Было установлено, что максимальное изменение X корпусной слюдосодержащей изоляции при уменьшении содержания эпоксидного компаунда до минимально допустимых пределов наблюдается в относительно небольших интервалах от 0,36 до 0,44 Вт/(м-К).

По этому пути ведутся работы фирмами Isovolta (Австрия) [27, 28] и ОАО ХК «Элинар» [104]. Для снижения содержания эпоксидного компаунда в изоляционных лентах используется новый тип стеклоткани, характеризующейся особой (плоской) конструкцией стеклянных стрендов (рис. 1.12). Использование нового типа стеклоткани [27] уменьшает толщину изоляции за счет снижения объемного содержания эпоксидного компаунда, и увеличивает поверхность контакта стеклоткани со слюдяной бумагой примерно на 30 %, в результате чего увеличивается коэффициент теплопроводности, а также длительная электрическая прочность корпусной изоляции. Подобная конструкция приводит к уменьшению толщины слоя эпоксидного компаунда в корпусной изоляции (рис. 1.13), что приводит к увеличению величины X для изоляции на основе оптимизированной ленты [27] и длительной электрической прочности, при этом значения диэлектрических потерь для изоляции из стандартной ленты и ленты с оптимизированной структурой практически идентичны [28].

Согласно второму методу, концепция создания корпусной изоляции с повышенной теплопроводностью заключается в применении мелкодисперсных наполнителей с высоким значением теплопроводности. Степень влияния наполнителей на А корпусной изоляции зависит от химической природы, размера и формы частиц наполнителя, их распределения в матрице полимера и взаимодействия наполнителя с компонентами изоляции.

## Методика измерения коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции

Измерение коэффициента теплопроводности проводилось методом динамического калориметра [90, 91, 104] с использованием прибора ИТ-А,-400. Прибор предназначен для исследования температурной зависимости теплопроводности твердых, механически обрабатываемых материалов в режиме монотонного нагрева. Блок питания и регулирования обеспечивает нагрев ядра измерительной ячейки со средней скоростью около 0,1 К/с и автоматическое регулирование температуры. Скорость разогрева определяется величиной начального напряжения на нагревателе и скоростью его изменения.

Тепловая схема метода показана на рис.2.8, конструкция измерительной ячейки показана на рис. 2.9.

Образец испытуемый (12), пластина контактная (2) и стержень (11) монотонно разогреваются тепловым потоком Q(T) поступающим от основания (1). Боковые поверхности стержня (11), образца (12), пластины (1), адиабатически изолированы. Стержень (11) и пластина контактная (2) изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, поэтому перепады температур на них незначительны. Тепловой поток Q(x) проходящий через среднее сечение пластины (1), частично поглощается ею и далее идет на разогрев образца (12) и стержня (11). Размеры системы выбраны таким образом, чтобы потоки, аккумулируемые образцом и пластиной, были по крайней мере в (5-10) раз меньше поглощаемых стержнем. В этом случае температурное поле образца (12) и пластины (2) оказывается близким к линейному, стационарному, все детали системы разогреваются с близким скоростям, а для тепловых потоков Q0(x) и QJ(T) и для любого уровня температуры справедливы формулы: где Q0(T) - тепловой поток, проходящий через образец и поглощаемый стержнем, Вт; v0 - перепад температуры на образце, К; Р - тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, (м"К)/Вт; С0 -полная теплоемкость образца, Дж/К; Сс - полная теплоемкость стержня, Дж/К; Ъ - скорость разогрева измерительной ячейки, К/с; S - площадь поперечного сечения образца, м . T(r)=K;vT=( cT+cn+co+cc)b, где Qj(x) - тепловой поток, проходящий через среднее сечение пластины, Вт; Кт - коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную тепловую проводимость пластины, Вт/К; Vj — перепад температуры на пластине, К; Ст - полная теплоемкость пластины (2), Дж/К; С„ - полная теплоемкость пластины контактной, Дж/К.

Тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной определяется по формуле: где Ро - тепловое сопротивление образца, Вт-м -К, Рк - поправка, учитывающая тепловое сопротивление контакта, неидентичность и тепловое сопротивление заделки термопар, Вт-м -К.

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле: где h - высота образца, м;Х- теплопроводность образца, Вт/(м-К).

На основании вышеприведенных формул рассчитываются рабочие расчетные формулы для теплового сопротивления образца и его теплопроводности: где сс - поправка, учитывающая теплоемкость образца; где Со - полная теплоемкость испытуемого образца, Дж/(кг-К); Сс - полная теплоемкость стержня, Дж/К: где Co(t) - ориентировочное значение удельной теплоемкости образца, Дж/(кг-К), т0 - масса образца, кг: где См(і) — удельная теплоемкость меди, Дж/(кг К); тс — масса стержня, кг.

Влияние ос обычно не превышает (5-10) % и может оцениваться по ориентировочным данным теплоемкости образца. Значение тепловой проводимости пластины Кт и коэффициент теплопроводности образца определяются по следующим формулам:

Вычисленные значения теплопроводности образца следует относить к средней температуре образца, которая определяется по формуле: где t - средняя температура образца, С; tc - температура, при которой проводилось измерение теплопроводности, С; At - чувствительность термопары хромель-алюмель, К/мВ; п0 - перепад температуры на образце, мВ.

Параметры Кт и Рк не зависят от свойств испытуемого образца, являются «постоянными» измерителя. Значения Рк обычно дано для материала с X = 2 -5 Вт/(м-К) и не превышают 10-20% теплового сопротивления образца. Определение Кт и Рк проводится в градуировочных экспериментах с образцовой мерой из кварцевого стекла и образцом из меди, входящими в комплект поставки прибора. Для определения теплопроводности испытуемого образца в эксперименте необходимо на различных уровнях температуры измерять перепады температуры на тепломере vT и образце v0 - в микровольтах, мкВ.

Измерение теплопроводности производилось на образцах, изготовленных в соответствии с рис. 2.10 и таблицей 2.3.

Выбор высоты образца в зависимости от ожидаемого значения теплопроводности

Для образцов слюдосодержащей изоляции, согласно таблице 2.3, толщина образцов была выбрана в пределах (0,5 - 2,0) мм.

## Исследование диэлектрических потерь образцов корпусной изоляции на основе предварительно пропитанных слюдосодержащих лент

Испытания проводились с использованием модельных и макетных образцов, а также реальных испытательных объектов. Применялись:

— модельные образцы в виде плоских пластин, изготовленных прессованием (по ГОСТ 26103-84);

— макетные образцы (6x30x800 мм) с расчетной толщиной изоляции 2 мм, изготовленные методом гидростатической опрессовки в битуме;

— стержни гидрогенератора (чертежи №5БС.542.033 и №5БС.542.034), изготовленные методом гидростатической опрессовки в битуме.

Измерение tg5 проводились в температурном диапазоне от 20 С до 155 С с шагом в 20 С, при 5 значениях напряженности испытательного поля (1 5 кВ/мм). Испытания проводились при частоте 50 Гц. Объем выборки составлял не менее 10 шт. (для макетов) и не менее 2-3 шт. (для реальных стержней).

В таблице 3.4 представлены результаты испытания tg5 макетов изоляции, изготовленных из различных слюдосодержащих лент.

Значения tg5 изоляции макетов при температуре 155 Си напряженности электрического поля 1 кВ/мм

По данным [97] для корпусной изоляции, изготовленной из лент ЛТСС-3 МУ (технология Слюдотерм), диэлектрические потери при максимально допустимой температуре превышают (40-50) %.

Следовательно, как видно из представленных результатов, корпусная изоляция на основе зарубежных лент (производства VonRoll, Cogebi) имеет низкие потери в высокотемпературной области, а в изоляции на основе отечественных материалов диэлектрические потери существенно превышают современные допустимые пределы, что делает невозможным ее использование в конструкции современных мощных гидрогенераторов.

Как следует из рис. 3.1 и 3.2 для всех исследованных макетов увеличение испытательной напряженности электрического поля от 1 до 5 кВ/мм практически не влияет на величину tgS изоляции во всем исследованном температурном диапазоне. Это свидетельствует о монолитности изоляции, изготовленной по технологии Элмикатерм, что также подтверждается результатами контроля этой изоляции по характеристикам частичных разрядов (ЧР). С увеличением испытательной напряженности электрического поля интенсивность ЧР практически не изменяется, что свидетельствует об отсутствии дефектов в изоляции (газовых пузырей, протяженных отслоений на границах разделов компонентов изоляции).

С ростом испытательной температуры наблюдается увеличение tg8 изоляции, причем для базового варианта предварительно пропитанной ленты Элмикатерм 55409 этот рост наиболее выражен (рис. 3.3), что, по всей видимости, обуславливается более высокой сегментальной подвижностью компонентов данного материала при повышенных температурах, по сравнению с другими исследованными образцами.

На рис. 3.4 приведены графики зависимостей lg(tg5) = F(l/T) для изоляции макетов, изготовленной из всех вариантов пропитанной ленты Элмикатерм 55409. Как можно видеть, для всех образцов графики зависимостей lg(tg8)=F(l/T) в исследованном диапазоне температур (20 - 155) С могут быть представлены в виде двух отрезков прямых линий, характеризующихся разным углом наклона к оси абсцисс. По-видимому, это объясняется тем, что в разных температурных зонах на диэлектрические потери в слюдосодержащей изоляции влияют различные физические явления, происходящие за счет изменения температуры. А именно, в низкотемпературной зоне это, по-видимому, главным образом межслоевая поляризация, а в высокотемпературной - дипольно-релаксационная поляризация, а также ионная проводимость. Следовательно, для исследуемых макетных образцов выполняется экспоненциальное соотношение:

Энергия активации диэлектрических потерь для изоляции макетов, изготовленной из опытных пропитанных лент Элмикатерм 55409. (Режим опрессов ки макетов в битуме: 160 С при 6 ч).

Как следует из приведенных данных, отличия между базовым и опытными вариантами лент Элмикатерм 55409 проявляются в основном в высокотемпературной зоне, значения tgS и энергии активации диэлектрических потерь в низкотемпературной зоне отличаются незначительно. Изоляция, изготовленная из базового варианта исследуемой ленты Элмикатерм 55409, характеризуется максимальными значениями tg 5 во всем температурном диапазоне. Снижение концентрации пластифицирующих добавок в составе пропитывающего лака приводит к уменьшению значений tg 5 и энергии активации W2itgs в высокотемпературной области. Минимальные значения tg 5 при 155 С наблюдаются для макетов, изготовленных из лент Элмикатерм 55409 (образец № 3), характеризующихся полным отсутствием пластификатора. Для уточнения поведения образцов изоляции, изготовленных из различных вариантов предварительно пропитанных лент Элмикатерм 55409, была исследована электропроводность плоских модельных образцов изоляции в диапазоне температур (25 - 155) С. На рис. 3.5 приведены зависимости логарифма удельной электропроводности от обратной температуры для образцов, изготовленных из лент Элмикатерм 55409. Как и в случае зависимостей lg(tg8) = F(l/T), графики зависимостей lg(a) = F(l/T) в исследованном температурном диапазоне могут быть представлены в виде отрезков прямых линий в двух температурных диапазонах.

В таблице 3.6 представлены расчетные значения энергий активации электрической проводимости, характерные для образцов изоляции на основе лент Элмикатерм 55409, в низко- и высокотемпературных областях.

Изоляция, изготовленная из базового варианта ленты Элмикатерм 55409, характеризуется более высокой электропроводностью при высокой температуре по сравнению с изоляцией, изготовленной из непластифициро-ванной ленты. Важно отметить, что для всех исследованных вариантов значения энергии активации проводимости W2cr в высокотемпературной области практически совпадают со значениями энергии активации диэлектрических потерь W2tg5 (таблица 3.5). Следовательно, механизм диэлектрических потерь в исследованных образцах в высокотемпературной области обусловлен, главным образом, явлениями электропереноса.

Аналогичный характер изменения tg8 в температурном диапазоне от комнатной температуры до 155 С наблюдается также и для макетов изоляции, изготовленных из предварительно пропитанных лент зарубежного производства (Samicatherm производства VonRoll, Швейцария). Для этих образцов в таблице 3.7 приведены значения энергии активации W2ftgg в высокотемпературной области. Как видно из приведенных данных, изоляция на основе лент Samicatherm характеризуются более высокой низкими значениями tg8 в высокотемпературной области (6,3 - 7,3) %, однако эта изоляция обладает более высокой температурой Тс = 110 С по сравнению с изоляцией из лент Элмикатерм 55409, что, по-видимому, свидетельствует о большей жесткости изоляции Samicatherm.

Энергия активации диэлектрических потерь для изоляции, изготовленной из лент Samicatherm

С целью выбора оптимального режима изготовления корпусной изоляции проводились исследования, связанные с изучением влияния дополнительной термообработки на диэлектрические потери образцов корпусной изоляции. Для этого опрессованные образцы корпусной изоляции (режим оп-рессовки - 6 час при 160 С) дополнительно подвергались термообработке при температуре 160 С в течение 6, 9 и 12 часов. В таблице 3.8 приведены значения tg5 при 155 С для макетов изоляции, прошедших режим дополнительной термообработки.

Значения tg8 (155 С) для макетов изоляции при 3 кВ/мм после дополнительной термообработки

Как следует из приведенных в таблице 3.8 данных, увеличение продолжительности дополнительной термообработки приводит к снижению диэлектрических потерь корпусной изоляции.

Другой важной технологической процедурой, предназначенной для улучшения диэлектрических характеристик корпусной изоляции, является применение комбинированной изоляции, состоящей из двух или нескольких чередующихся изоляционных лент, каждая из которых имеет определенные параметры. Впервые подобная комбинированная система (в составе изоляционных лент ЛС-ЭН-526Т и Элмикатерм 55409) была изучена в [41], там же было установлено влияние технологического параметра Пл («плотности изоляции») на диэлектрические потери корпусной изоляции.

В таблице 3.9 приведены результаты определения tg5 макетов корпусной изоляции, изготовленных с применением различных изоляционных лент. Введение лент ЛС-ЭН-526Т во внутренние слои изоляции, прилегающие к поверхности стержня, во всех исследованных вариантах приводит к снижению tg8 изоляции в высокотемпературной области. При использовании опытного образца № 3 ленты Элмикатерм 55409 величина tg8 при температуре 155 С не превышает 9 %, то есть удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к мощным гидрогенераторам с воздушным охлаждением.

## Результаты определения коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции, изготовленных из различных слюдосодержащих лент

В таблице 4.3 приведены результаты определения коэффициента теплопроводности и содержания связующего образцов корпусной изоляции, изготовленных из исследованных предварительно пропитанных лент в интервале температур от 50 до 150 С.

На рис. 4.1 приведены графики зависимостей X = f (Т) для образцов корпусной изоляции, изготовленной из различных типов предварительно пропитанных лент. Для всех исследованных образцов изоляции наблюдается монотонное увеличение величины коэффициента теплопроводности с ростом температуры. Для лент типа Calmicafab с оптимизированной с точки зрения теплопроводности структурой во всем исследованном интервале температур значения коэффициента теплопроводности выше, чем для стандартных лент (Элмикатерм 52409 и 55409).

На рис. 4.2 приведены графики зависимостей коэффициента теплопроводности от содержания связующего при температуре 100 С для образцов изоляции, изготовленных из исследованных лент (Элмикатерм 55409, Элмикатерм 52409, Calmicafab 3416, Calmicafab 3293, Calmicafab 06Н001). Приведенные результаты соответствуют температуре 100 С. но установленная закономерность отмечается во всем исследованном температурном диапазоне. С уменьшением содержания эпоксидного связующего в изоляции величина коэффициента теплопроводности линейно возрастает при всех исследованых значениях температуры. Эта зависимость может быть достаточно удовлетворительно аппроксимирована следующим регрессионным выражением: где а - содержание эпоксиноволачного связующего, %; иА- коэффициенты регрессии.

Среднее значение коэффициента регрессии Хо в исследованном температурном диапазоне составляет для образцов изоляции из предварительно пропитанных лент (0,412±0,008) Вт/(м-К).

В таблице 4.4 приведены результаты определения коэффициента теплопроводности и содержания связующего образцов корпусной изоляции, изготовленных из исследованных непропитанных лент методом вакуум-нагнетательной пропитки в интервале температур от 50 до 150 С.

Графики зависимостей X =f(T) для образцов корпусной изоляции, изготовленной из непропитанных лент типа Poroband ME 2599 и Porofab МЕ3290, приведены на рис. 4.3, а на рис. 4.4 - из лент Porofab МЕ3434, не имеющих в своем составе наполнителя, характеризующегося высокой теплопроводностью. Как видно, для образцов, изготовленных методом вакуум-нагнетательной пропитки, также как и для образцов, изготовленных из предварительно пропитанных лент методом гидростатической опрессовки, наблюдается увеличение величины коэффициента теплопроводности с ростом испытательной температуры.

На рис. 4.5 приведен график зависимости коэффициента теплопроводности от содержания связующего ПК-11 (а) при температур 100 С для образцов изоляции, изготовленных из непропитанных лент типа Poroband и Porofab. Как следует из этих данных, снижение содержания эпоксидно-ангидридного компаунда в образце изоляции приводит к увеличению величины коэффициента теплопроводности в исследованном температурном диапазоне, согласно эмпирическому выражению (4-1). Среднее значение коэффициента регрессии XQ В исследованном температурном диапазоне составляет для образцов изоляции из предварительно пропитанных лент (0,37±0,02) Вт/(м-К).

На рис. 4.6 приведены зависимости X - f (Т) для образцов корпусной изоляции, изготовленной из непропитанных лент с мелкодисперсным наполнителем (А1203): Элмикапор 533099 0,16 УТ и Samicapor НТС 381.55-20. Как видно, для наполненных «сухих» лент зависимость коэффициента теплопроводности от температуры менее выражена, чем для ненаполненных слюдосо-держащих лент.

Во всем исследованном интервале температур величина коэффициента теплопроводности образцов корпусной изоляции, изготовленной с использованием лент Samicapor НТС 381.55-20, существенно выше, чем для образцов, изготовленных из лент Элмикапор 533099 0,16 УТ, что, по всей видимости, обусловлено технологическими недоработками (неравномерность распределения наполнителя по объему ленты) ленты Элмикапор 533099 0,16 УТ.

Для образцов изоляции, изготовленных из лент Samicapor НТС 381.55-20, линейной корреляционной связи между значением коэффициента теплопроводности и содержанием связующего не обнаружено. При высоком содержании связующего в изоляции (более 30 %), значение коэффициента теплопроводности не высоко (не превышает 0,4 Вт/(м-К)). Уменьшение содержания связующего (менее 30 %), достигаемое увеличением степени опрес-совки образца, приводит к существенному росту теплопроводности (к 0,5 Вт/(м-К)). Дальнейшее снижение содержания связующего в образце изоляции практически не приводит к изменению величины коэффициента теплопроводности изоляции. По-видимому, подобное изменение величины коэффициента теплопроводности наполненной изоляции связано с формированием в изоляции сплошных объемных фрагментов, состоящих их контактирующих друг с другом зерен А120з (проводящих кластеров). Очевидно, что подобные кластеры образуются за счет уменьшения прослоек связующего в изоляции в процессе механической опрессовки образца изоляции из лент Samicapor НТС 381.55-20, с высоким содержанием А120з.