

На правах рукописи



ЯГУПОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НИТРИДОМ АЛЮМИНИЯ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.17.11 – «Технология силикатных
и тугоплавких неметаллических материалов»

Специальность 05.17.06 – «Технология
и переработка полимеров и композитов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре редких металлов и наноматериалов ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, Бекетов Аскольд Рафаилович.

Официальные оппоненты:

Белякова Елена Германовна, доктор технических наук, ОАО «Опытное конструкторское бюро «Новатор», г. Екатеринбург, начальник конструкторского бюро.

Стоянов Олег Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», декан факультета технологии, переработки и сертификации пластмасс и композитов.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт химии твердого тела УрО РАН».

Защита состоится **26 декабря 2012 г. в 15⁰⁰** на заседании диссертационного совета Д 212.285.09 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, зал ученого совета университета (ауд. И-420).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 23 ноября 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор химических наук



Ямщиков

Леонид Фёдорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в мировом электромашиностроении интенсивность отказов электродвигателей в сотни раз превышает интенсивность отказов изделий машиностроения, 80% и более электродвигателей выходят из строя из-за повреждения обмотки статора по причине электрического пробоя и механического разрушения.

Недостаточная надежность асинхронных двигателей определяется технологией изготовления и условиями эксплуатации – многозначными функциями нескольких, как правило, случайных факторов и величин. Повышение надежности требует кардинального изменения конструктивного исполнения и концептуального решения технологии производства электромеханических и электромагнитных преобразователей. В первую очередь это касается организации производства композиционных электроизоляционных материалов с улучшенными теплофизическими свойствами для пропитки статоров и капсулирования лобовых частей асинхронных электродвигателей. Одним из путей повышения электрофизических параметров является введение в пропиточные лаки неорганических соединений с высокими электрофизическими характеристиками и улучшенными теплофизическими свойствами. Применение, в качестве наполнителей пропиточных лаков, оксида алюминия, оксида магния, нитрида бора и др. имеет существенные недостатки и необходим поиск новых модификаторов электроизоляционных пропиточных лаков.

Актуальным и перспективным является использование нитрида алюминия (AlN) в качестве модификатора электроизоляционных пропиточных лаков. Применение нитрида алюминия открывает новые возможности повышения надежности и эффективности асинхронных двигателей, так как этот материал обладает уникальным сочетанием физических и электрических характеристик: высокой теплопроводностью, хорошими электроизоляционными характеристиками, умеренным коэффициентом

теплового расширения, высокой огнеупорностью и химической стойкостью при относительно невысокой стоимости.

Целью работы является выбор состава, определение физико-химических характеристик нового композиционного материала «AlN – электроизоляционный лак» и разработка технологии модифицирования нитридом алюминия электроизоляционных лаков.

Задачи работы

Для разработки технологии пропитки и капсулирования асинхронных электродвигателей новым композиционным материалом необходимо решить следующие задачи:

- исследовать устойчивость дисперсной системы «электроизоляционный лак – нитрид алюминия»;
- исследовать вязкость электроизоляционного лака с добавками нитрида алюминия;
- исследовать теплофизические свойства неотвержденного и отвержденного композиционного материала «AlN – электроизоляционный лак»;
- исследовать электрофизические параметры отвержденного композиционного материала «AlN – электроизоляционный лак»;
- разработать технологию получения композиционного материала «AlN – электроизоляционный лак»;
- изготовить опытные образцы асинхронных электродвигателей и определить их эксплуатационные характеристики с целью подтверждения эффективности применения нового композиционного материала.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследований взаимодействия частиц нитрида алюминия, полученного газофазным способом, с водными и органическими средами.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния содержания нитрида алюминия и температуры на вязкость электроизоляционного лака.

3. Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств неотвержденного электроизоляционного лака с добавками AlN и отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак».

4. Результаты экспериментальных исследований влияния нитрида алюминия на электрофизические параметры отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак».

5. Технология модифицирования нитридом алюминия электроизоляционных лаков и технологическая схема пропитки обмотки статора асинхронного электродвигателя новым композиционным материалом «AlN – кремнийорганический лак».

Научная новизна работы

1. Впервые получен новый композиционный материал «AlN – кремнийорганический лак», и, по результатам проведенных исследований устойчивости, вязкости, теплопроводности и электрофизических параметров, установлены следующие зависимости:

- электрокинетических параметров частиц нитрида алюминия, полученного газофазным способом, от pH среды и содержания AlN;
- вязкости раствора кремнийорганического лака с добавками нитрида алюминия от содержания наполнителя и температуры, представленные в виде математических уравнений;
- теплопроводности неотвержденного и отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак» от объемного содержания модификатора;
- удельного объемного сопротивления и напряжения пробоя отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак» от объемного содержания AlN.

2. Предложена модель структуры композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак».

3. Определены оптимальные технологические параметры производства.

Практическая значимость работы

1. Разработана технология модифицирования нитридом алюминия электроизоляционных лаков и предложена технологическая схема пропитки статоров асинхронных электродвигателей пропиточным составом на основе неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак».

2. Применение нитрида алюминия позволяет в 3 раза сократить количество операций пропитки и, соответственно, время обработки статора электродвигателя.

3. Однократная пропитка статора электродвигателя композиционным материалом «AlN – кремнийорганический лак» позволяет добиться результирующего снижения нагрева обмотки статора по сравнению с серийной машиной до 15,8°C, что приводит к увеличению срока службы в 2,4 раза и увеличению коэффициента полезного действия на 1,15%.

4. Ожидаемый ежегодный экономический эффект у потребителей от применения композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак» в Уральском регионе может составить до 2 млрд. руб. в год за счет увеличения срока службы и КПД электродвигателя.

Личный вклад автора

Исходя из требований, предъявляемых к электроизоляционным пропиточным материалам, автором сформулированы задачи исследования, проведен литературный обзор, разработаны методики выполнения анализов и экспериментов, поставлены исследования, обработаны и проанализированы полученные экспериментальные данные, разработана технология модифицирования нитридом алюминия электроизоляционных лаков, предложена технологическая схема пропитки обмотки статоров асинхронных электродвигателей и проведен процесс пропитки статоров опытных образцов асинхронных электродвигателей с использованием композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак».

Реализация результатов работы

Изготовлена опытная серия асинхронных электродвигателей с улучшенной пазовой изоляцией статора, увеличенным ресурсом и повышенным коэффициентом полезного действия.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на VI Всероссийской научной конференции «Керамика и композиционные материалы» (Сыктывкар, 2007), на Всероссийской студенческой олимпиаде, научно-практической конференции и выставке работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2009, 2010), на III и IV Международных научно-технических конференциях «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (Екатеринбург, 2007, 2011), на 9-й международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» в рамках выставки «Энергетика и электротехника. Автоматизированные системы и приборостроение. Светотехника» (Екатеринбург, 2010), на XVIII Уральской международной конференции молодых учёных по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург 2010), на 7-й и 8-й научно-технических конференциях ОАО «ОКБ «Новатор» «Люльевские чтения» (Екатеринбург, 2010, 2011).

Настоящая работа выполнялась согласно Свердловской областной программе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Оксидонитридные материалы для повышения эффективности электромеханических и электромагнитных преобразователей».

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ и 1 электронная работа, в том числе 13 статей, 5 из которых в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованных источников, включающего 120 наименований, и приложений. Работа изложена на 145 страницах, содержит 64 рисунка и 30 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и необходимость проведения исследований изложенных в настоящей работе.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы. Рассмотрены принципы создания композиционных материалов, требования, предъявляемые к полимерным связующим и наполнителям для электротехнической промышленности, возможности повышения надёжности и работоспособности асинхронных электродвигателей. Отмечено, что передача теплоты теплопроводностью в электродвигателях имеет большое значение.

Применяемые сегодня модификаторы имеют существенные недостатки, и это определяет необходимость поиска новых неорганических присадок в композиционные электроизоляционные материалы. При создании композиционных электроизоляционных материалов практически не были исследованы тугоплавкие составляющие с высокой теплопроводностью (до 300 Вт/(м·К) в монокристаллическом состоянии), такие как нитрид алюминия. Опубликованные физико-химические характеристики нитрида алюминия свидетельствуют о перспективном его использовании в качестве модификатора электроизоляционного лака, поэтому изучение вопроса модифицирования полимерных материалов нитридными частицами весьма актуально. Рассмотрены преимущества нитрида алюминия перед другими модификаторами и основные методы синтеза порошкообразного нитрида алюминия. Обоснован выбор газофазного способа получения материала для данной работы. Сделан вывод, что физико-химические свойства полимерного композита «AlN – электроизоляционный лак» изучены явно недостаточно, и для разработки технологии его получения необходимо проведение всесторонних исследований. Сформулирована цель настоящей работы и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены исходные материалы и применяемые в настоящей работе методы исследования.

В качестве модификатора в работе использовался нитрид алюминия, полученный газофазным способом на опытно-промышленной установке (рисунок 1). Данный способ обладает рядом преимуществ и позволяет получать из широко используемых в промышленности компонентов нитрид алюминия требуемого химического состава в промышленных масштабах. Исходный нитрид алюминия обладал достаточно высокой теплопроводностью – порядка 100 Вт/(м·К) в компактном состоянии при плотности 3,15 г/см³. Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 2. Химический состав исходного порошка приведен в таблице 1. Как видно на фотографии, полученной с помощью туннельного микроскопа (рисунок 3), отдельные частицы нитрида алюминия имеют овальную форму, наноразмерны и агломерируются в конгломераты размером до десяти микрон (рисунок 4).



Рисунок 1 – Установка для получения нитрида алюминия газофазным способом

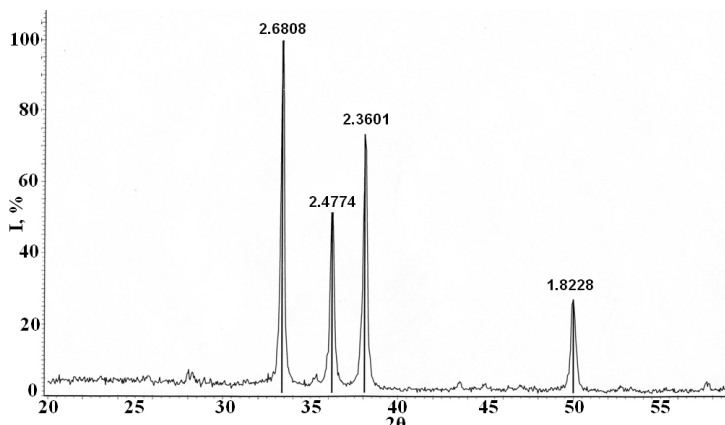


Рисунок 2 – Результаты рентгенофазового анализа порошка AlN

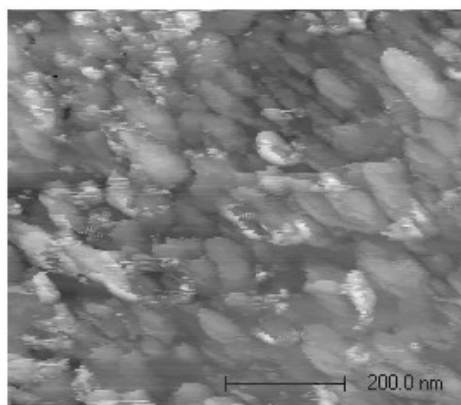


Рисунок 3 – Фотография AlN

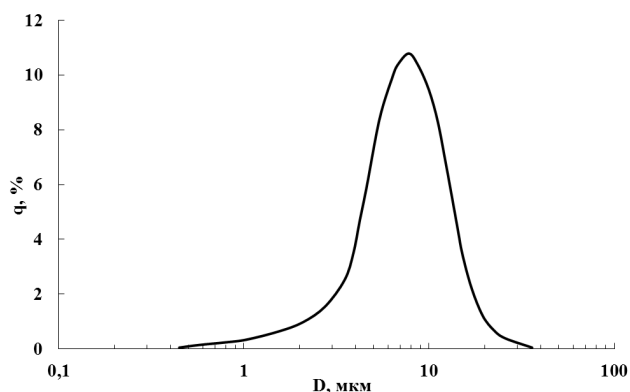


Рисунок 4 – Результаты седиментационного анализа порошка AlN

Таблица 1 –Химический состав нитрида алюминия (AlN)

Al, мас.%	N, мас.%	O, мас.%	Fe, мас.%	C, мас.%	Mg, мас.%	Si, мас.%
65,5	32,5	1,3	0,10	0,53	0,035	0,019

Для усовершенствования была выбрана технология изготовления обмотки статора асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт, напряжением до 1000 В, имеющих всыпные обмотки. Такие двигатели потребляют более 35 % всей вырабатываемой электроэнергии. При изготовлении выбранного типа электродвигателей по существующей технологии на ЗАО «Уралэлектромаш» используется лак КО-916К. Кремнийорганический электроизоляционный лак для пропитки обмоток статоров асинхронных электродвигателей КО-916К представляет собой раствор полиорганосилоксановой смолы, модифицированной полиэфиром в ксилоле, с массовой долей нелетучих веществ 64-68%, отверждается термически.

Во второй части главы приведены стандартные методы исследований материалов и перечислено оборудование, на котором производились измерения:

- ИК-спектроскопия для определения состава поверхности нитрида алюминия (ИК-спектрофотометры: Specord M-80, Bruker VERTEX-70);
- макроэлектрофорез для определения величины и знака заряда поверхности AlN (U образная трубка);
- седиментация для определения размера частиц AlN (сканирующий фотоседиментограф СФ-2)
- лазерная дифракция (лазерные анализаторы размеров частиц: Horiba LA-950, Mastersizer 2000);
- растровая электронная микроскопия для определения размера и формы частиц нитрида алюминия (сканирующие электронные микроскопы: Tesla BS-301, JSM6390LA)
- туннельная микроскопия для определения размера и формы частиц нитрида алюминия (сканирующий туннельный микроскоп СТМ СММ-2000Т);

- оптическая микроскопия для определения размеров частиц в полимерном композиционном материале «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» (инвертированный микроскоп отраженного света Olympus GX71);
- рентгенофазовый анализ для идентификации (входного контроля) исходного материала (модернизированный рентгеновский дифрактометр ДРОН-2);
- калориметрия для выяснения влияния наполнителя (AlN) на процесс отверждения лака (КО-916К) (дифференциальный сканирующий калориметр METTLER TOLEDO DSC 823e)
- вискозиметрия для определения вязкости неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» (вискозиметры: Model B, B3-1);
- метод коаксиальных цилиндров для определения теплопроводности неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»;
- метод лазерной вспышки для определения теплопроводности отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» (приборы синхронного термического анализа NETZSCH LFA 457 MicroFlash™, ANTER 4010);
- метод измерения удельного объемного сопротивления, ГОСТ Р 50499–93;
- метод определения электрической прочности, ГОСТ 15150-69 (установка высокого переменного напряжения TuR-10);
- метод определения параметров электродвигателя, ГОСТ 7217-87.

В третьей главе рассмотрены физико-химические предпосылки для создания технологии получения композиционных материалов «нитрид алюминия – органическое связующее». Подробно рассмотрены факторы, влияющие на устойчивость системы «нитрид алюминия – органический растворитель», и сделан вывод об определяющем влиянии агломерационной устойчивости нитрида алюминия на седиментационную устойчивость системы.

Для определения механизма взаимодействия и прогнозирования склонности к агрегации частиц AlN, в зависимости от их размера, в настоящей работе проводилось определение электрокинетических параметров частиц нитрида алюминия. В технологической практике дисперсный нитрид алюминия интенсивно взаимодействует с парами воды и другими компонентами атмосферной среды. Вода, в качестве примеси, также может присутствовать в органической фазе. С этим связан выбор среды для определения электрокинетических параметров частиц AlN. Результаты определения электрокинетического потенциала (ξ) порошка нитрида алюминия в водных растворах с различным значением pH среды приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения ξ -потенциала AlN в водном растворе в зависимости от pH среды.

pH среды	4,76	5,81	9,16	10,65	12,19
ξ , мВ	139	111	121	127	137

Полученные результаты показывают, что частицы нитрида алюминия во всем исследованном интервале pH заряжены положительно. При этом зависимость величины электрокинетического потенциала от реакции среды объясняется проявлением поверхностной активности AlN в водных средах.

Зависимость электрокинетического потенциала ξ нитрида алюминия в водном растворе от его молярной концентрации приведена в таблице 3. Как видно из таблицы 3, электрокинетический потенциал частиц нитрида алюминия с увеличением их содержания в системе монотонно снижается. Это, с одной стороны, связано со сжатием двойного электрического слоя, за счет уменьшения его диффузной части, а с другой – с возможным агрегатированием частиц при концентрировании дисперсной фазы.

Таблица 3 – Значения ξ -потенциала AlN в водном растворе в зависимости от молярной концентрации.

C, моль/л	0,027	0,035	0,07	0,10	0,17
ξ , мВ	111	86	69	65	47

Для определения строения поверхностных слоев нитрида алюминия проанализировали результаты инфракрасной спектроскопии исследуемых порошков в водном растворе при различных значениях pH (рисунок 5) и в органической среде (рисунок 6).

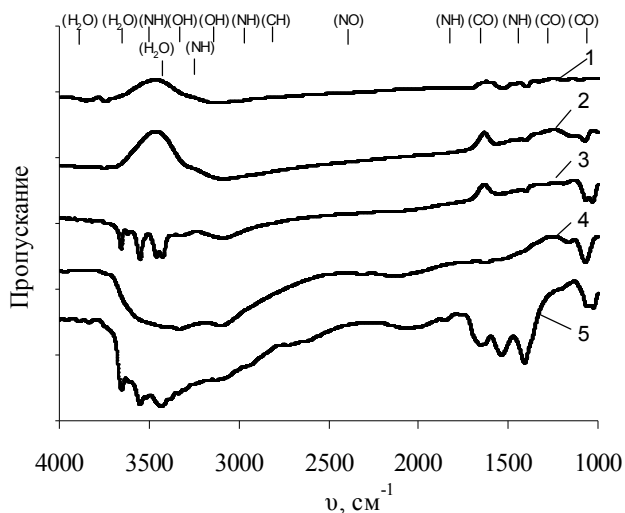


Рисунок 5 – Инфракрасные спектры нитрида алюминия в водных средах с различным значением pH: 1 - исходный образец; 2 - pH = 2,38; 3 - pH = 4,76; 4 - pH = 9,16; 5 - pH = 12,19

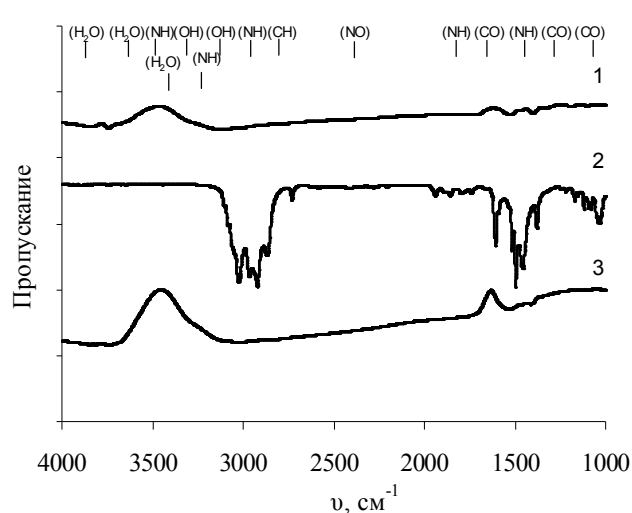


Рисунок 6 – Инфракрасные спектры нитрида алюминия в растворителе (ксилол): 1 – AlN, 2 – Ксилол, 3 – AlN в ксилоле

Инфракрасные спектры в водных растворах подтверждают наличие адсорбированных гидроксид-ионов, карбонат-ионов, аммиака и молекул воды. Анализ инфракрасных спектров нитрида алюминия в органической фазе свидетельствует о слабой адсорбции молекул растворителя на поверхности порошка. В каждом конкретном случае состав и состояние поверхности – это результат условий получения материала и его взаимодействия с дисперсионной средой, а структура двойного электрического слоя является результатом различных адсорбционных и ионизационных процессов. Основываясь на литературных данных и по результатам исследований электрокинетических характеристик и ИК-спектров, была предложена модель структуры поверхности частиц AlN. Поверхность эта имеет сложный атомарный состав, ее димерная структура в общем виде приведена на рисунке 7.

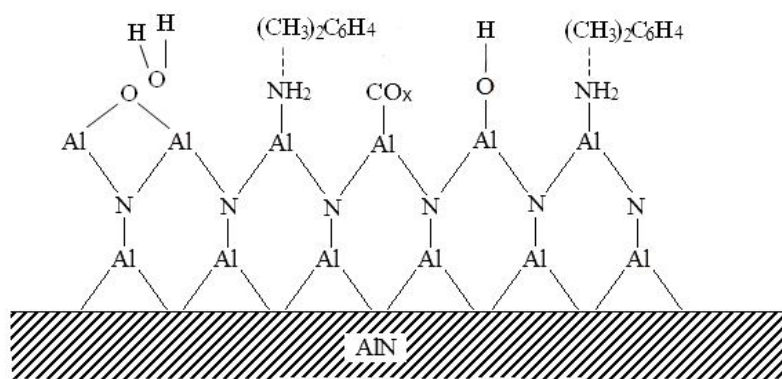


Рисунок 7 – Двумерная схема, отражающая поверхностную структуру частиц AlN

Положительный заряд частиц порошка AlN во всем диапазоне pH позволяет предположить, что функцию потенциалопределяющих ионов выполняют ионы алюминия.

Известно, что классический потенциал взаимодействия двух частиц возникает за счет действия сил притяжения и отталкивания. Для оценки агломерационной устойчивости были проведены расчеты по формулам (1) и (2), и показано, что электростатические силы отталкивания являются определяющими для частиц AlN размером более 0,8 мкм в чистых растворителях, которые применялись в настоящей работе.

Величину сил притяжения можно рассчитать по уравнению:

$$U_{\text{пр}} = -\frac{A \cdot a}{12H}, \quad (1)$$

где A – обобщенная константа Гамакера;

a – радиус частиц;

H – расстояние, разделяющее поверхности частиц.

Силы отталкивания рассчитаны для жидкостей с низкой ионной концентрацией:

$$U_{\text{от}} = \frac{\varepsilon a^2 \xi^2}{2(2a + H)}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая постоянная;

a – радиус частиц;

ξ – электрокинетический потенциал;

H – расстояние, разделяющее поверхности частиц.

По результатам исследования седиментационной устойчивости системы, приведенным на рисунке 8, видно, что частицы такого размера могут находиться в объеме раствора, не осаждаясь, до 38 часов. Следовательно, дополнительным внешним воздействием мы можем добиться равномерного распределения частиц нитрида алюминия в пропиточном растворе в течение времени, необходимого для проведения процесса пропитки обмотки статора.

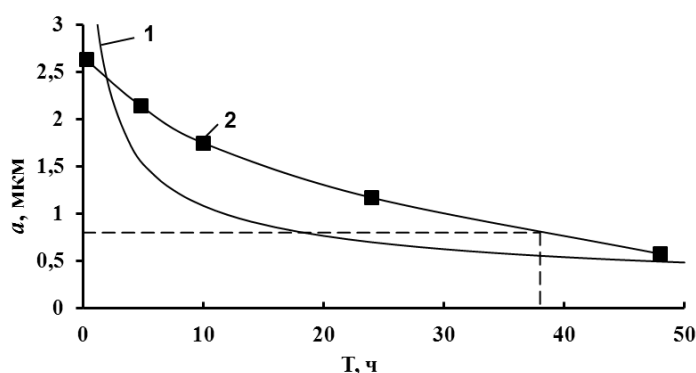


Рисунок 8 – Результаты определения седиментационной устойчивости растворителя с добавкой нитрида алюминия:

1 – Критический размер частиц по Стоксу;
2 – Экспериментальные данные

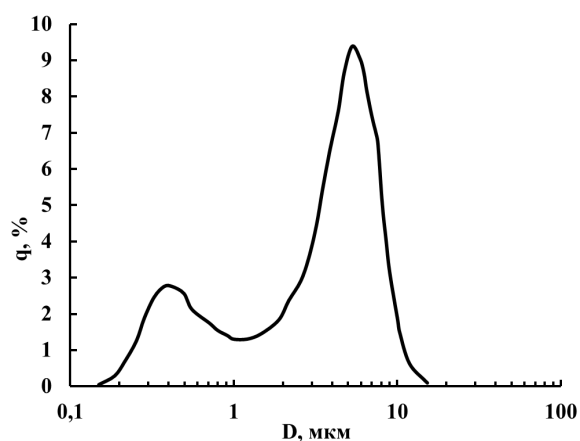


Рисунок 9 – Результаты седиментационного анализа AlN после обработки

Результаты анализа крупности частиц после дополнительного ультразвукового воздействия приведены на рисунке 9. Из результатов следует, что после воздействия ультразвуком на порошок нитрида алюминия в растворителе удалось разбить часть исходных агломератов (порядка 5 мкм) до размеров менее 1 мкм.

Для того чтобы выяснить особенности химического взаимодействия компонентов в процессе отверждения, был проведен дополнительный анализ методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Результаты исследования приведены на рисунке 10.

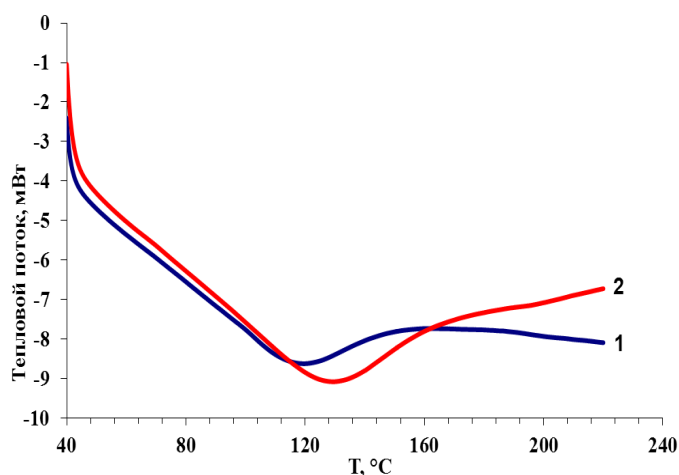


Рисунок 10 – Результаты исследования чистого лака КО-916К (1) и композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» (2) методом дифференциальной сканирующей калориметрии

На рисунке 10 на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии видны экстремумы при 119°C и 129°C, которые соответствуют температурам максимальной скорости отверждения чистого лака КО-916К и полимерного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К». Введение нитрида алюминия в кремнийорганический лак приводит к повышению температуры кристаллизации на 10°C. При одинаковом нагреве полимера следует ожидать, что процесс отверждения будет более энергозатратным, но при этом введение AlN повысит нагревостойкость изоляционного материала.

В результате деструкции полиорганосилоксаны теряют органические группы, находящиеся в боковой цепи полимера и их место занимает кислород, образуя новые силоксановые связи. Наряду с этим в процессе термоокислительной деструкции образуются гидроксильные группы у атома кремния, которые вступают в реакцию с поверхностными группировками неорганического модификатора. Структурная модель нитрида алюминия, представленная на рисунке 7, предложенная на основе всестороннего исследования поверхности материала с помощью современных методов, показывает, что на поверхности имеют место не только ОН-ионы, молекулы воды, но и ионы алюминия. В этих условиях происходит избирательная адсорбция компонентов полимерной среды. Образование новых химических

связей концевых ОН-ионов полимерных цепей с ионами алюминия весьма вероятно, тем более что энергия связи Al - OH (548 кДж/моль) больше, чем Si - OH (482 кДж/моль) в полимерных соединениях. Действия этих факторов, вероятно, и определяет тот факт, что нитрид алюминия в дисперсном состоянии является ингибитором для процесса отверждения кремнийорганических лаков.

Далее в работе изучалась вязкость электроизоляционного лака с различным содержанием нитрида алюминия. Измерения вязкости раствора проводились в интервале температур от 20 до 80°C. Результаты измерений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты измерений коэффициента вязкости (мПа·с) неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

Содержание AlN, об. %	Температура, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
0	30	28	26	25	23	23	23
10	32	30	29	29	29	29	31
20	106	44	83	44	61	48	49
30	440	319	249	200	176	133	110
40	1156	796	621	423	352	279	210
50	8580	5359	3205	1801	1204	808	511

Влияние температуры в интервале 20 – 80°C на значение вязкости неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» хорошо описывается уравнением (3):

$$\eta = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (3)$$

где η – величина вязкости, Па·с;
 B – температурный коэффициент;
 A – константа;
 T – температура опытов, К.

Влияние содержания наполнителя – нитрида алюминия в интервале 10 – 50 об.% при различных температурах хорошо описывается уравнением (4):

$$\eta = \eta_0 + Ae^{\frac{c}{B}}, \quad (4)$$

где η – величина вязкости, Па·с;
 η_0 – вязкость чистого лака при данной температуре, Па·с;
 A и B – постоянные коэффициенты;
 c – объемное содержание нитрида алюминия, об.%.

Значения всех констант в уравнениях 3 и 4 рассчитывали из экспериментальных данных для каждой зависимости. Эти значения приведены в таблицах 5 и 6

Таблица 5 – Значения постоянных коэффициентов в уравнении 3 для неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

Коэффициент	Содержание AlN, об.%					
	0	10	20	30	40	50
A	2.34	1.51	0.89	0.19	0.035	0.0001
B	753	1039	1412	2254	3051	5389

Таблица 6 – Значения постоянных коэффициентов в уравнении 4 для неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

Коэффициент	Температура, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
A	0,23	0,33	0,56	1,02	1,94	2,86	4,72
B	4,76	5,16	5,78	6,7	7,8	8,98	10,76
n_0	30,5	28	26	24	22	20	19

Представленные результаты свидетельствуют о том, что с ростом содержания нитрида алюминия вязкость полимера увеличивается, а с ростом температуры – уменьшается.

На следующем этапе изучалась теплопроводность неотвержденного электроизоляционного лака при различном содержании нитрида алюминия. Полученные результаты мы сравнили с теоретическими расчетами по различным математическим моделям для теплопроводности жидких сред. Графическое сравнение показано на рисунке 11. Лучше всего наши данные описывает модель Нильсена, предполагающая наличие в растворе частиц сферической формы. Введением наполнителя удалось добиться увеличения коэффициента теплопроводности исходного лака в 3 раза. Рост коэффициента теплопроводности способствует равномерному распределению температуры по объему раствора и в результате – однородности композита.

Так как теплопроводность изоляции статора полностью определяет тепловой режим работы электродвигателя, то на следующем этапе определялись коэффициенты теплопроводности отвержденного

композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак». Для анализа полученных результатов были рассмотрены современные модели, описывающие теплопроводность наполненных полимеров и проведена оценка применения рассмотренных моделей для расчета теплопроводности отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К». По полученным экспериментальным данным четко прослеживается зависимость теплопроводности композита от содержания наполнителя и температуры. Графическое сравнение наших измерений с основными математическими моделями представлено на рисунке 12.

Для описания нашего эксперимента больше других подходят модели, предложенные Оделевским и Дульневым, основанные на представлении, что частицы модификатора в материале изолированы друг от друга слоем матрицы и не соприкасаются между собой. Такая структура изображена на рисунке 13. На рисунке 14 приведена фотография отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К».

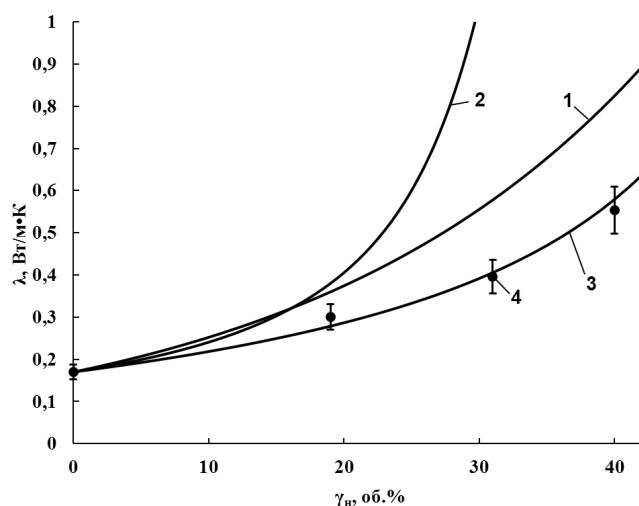


Рисунок 11 – Оценка применимости моделей для расчета теплопроводности полимерного лака, содержащего добавку нитрида алюминия:

- 1 – модель Агари и Уно; 2 – модель Оделевского; 3 – модель Нильсена; 4 – экспериментальные результаты

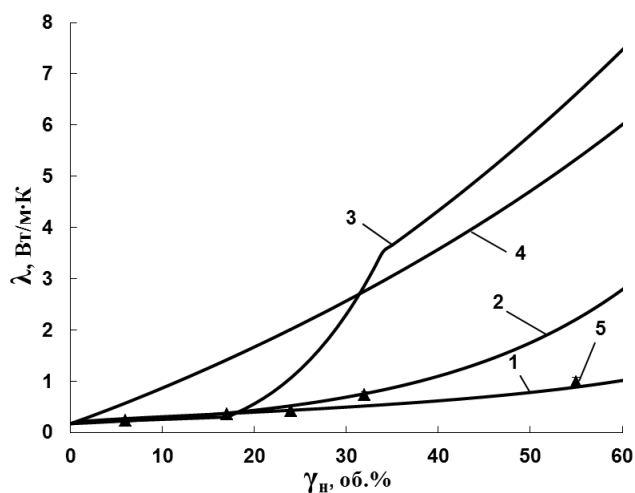


Рисунок 12 – Зависимость теплопроводности композита «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» от содержания AlN: 1 – модель с замкнутыми включениями; 2 – Модель обобщенной проводимости; 3 – Перколяционная модель; 4 – Модель с взаимопроникающими компонентами; 5 – Экспериментальные данные

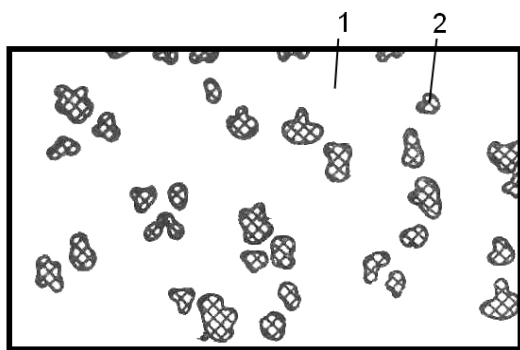


Рисунок 13 – Структура композиционного материала с замкнутыми включениями:
1 – кремнийорганический лак; 2 – нитрид алюминия

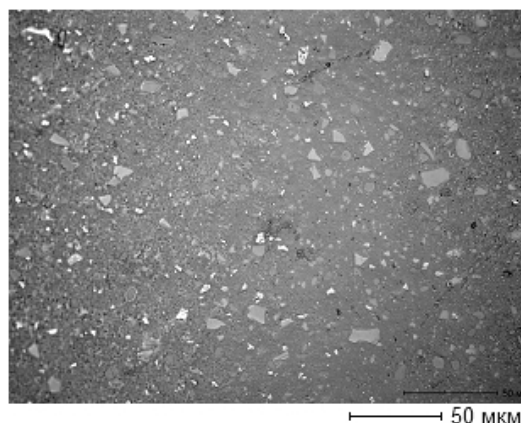


Рисунок 14 – Фотография отвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

Учитывая многостадийность необходимых исследований, в настоящей работе проведено определение электрофизических свойств композита «AlN – кремнийорганический лак КО-916К». Результаты измерений приведены в таблице 7. По ним видно, что с ростом содержания нитрида алюминия увеличивается объемное сопротивление, и значительно растет напряжение пробоя. Это свидетельствует о том, что пробой происходит по объему материала, а не по межфазной границе лака с наполнителем.

Таблица 7 – Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v и напряжения пробоя $U_{\text{проб}}$ композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К»

№/№	Содержание AlN (об.%)	Удельное объемное сопротивление, (Ом·м)	Напряжение пробоя, (кВ/мм)
1	0 (чистый лак)	$3,0 \cdot 10^{13}$	75
2	10	$3,3 \cdot 10^{13}$	102
3	30	$3,4 \cdot 10^{13}$	109

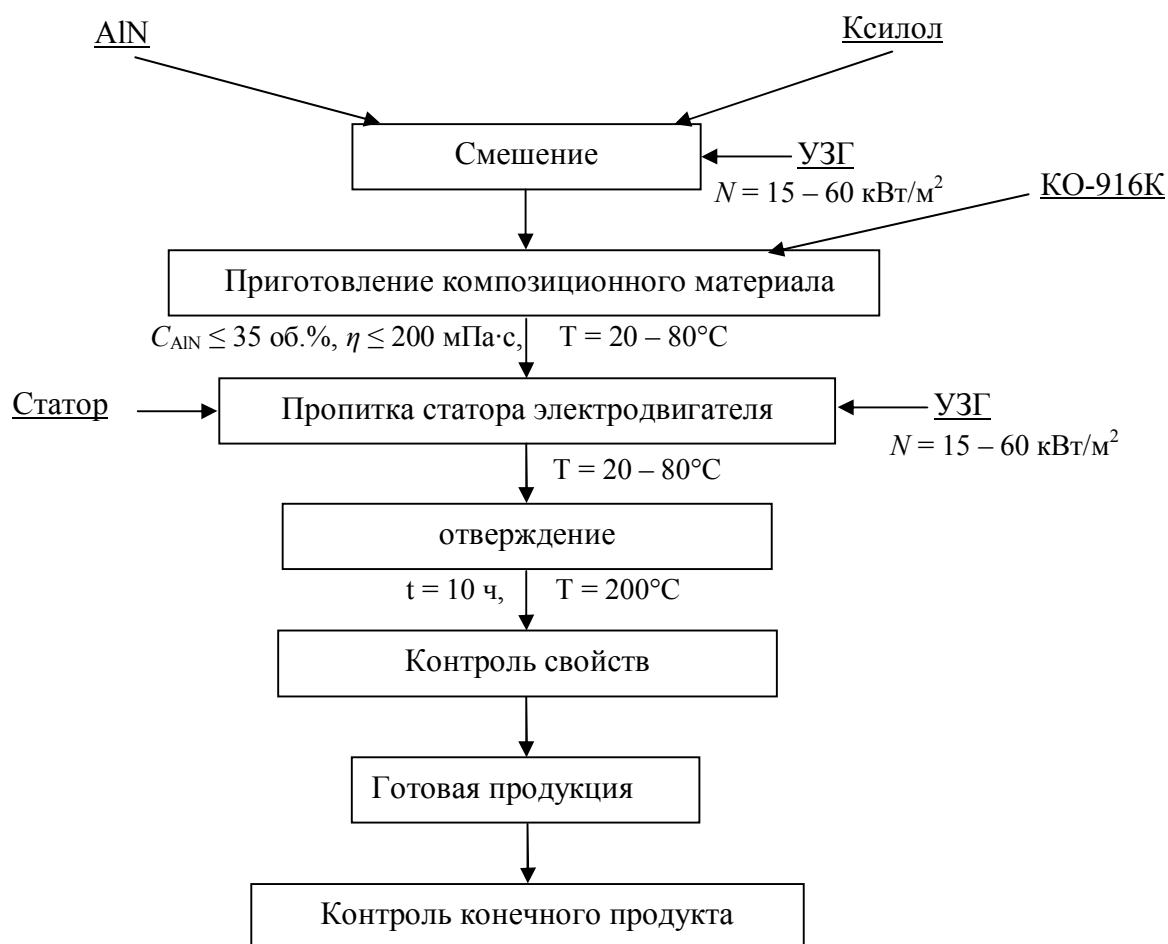


Рисунок 15 – Технологическая схема получения раствора электроизоляционного лака и пропитки асинхронного двигателя

В четвертой главе описана предложенная в работе технологическая схема пропитки статора асинхронного двигателя неотвержденным композиционным материалом « AlN – кремнийорганический лак КО-916К» (рисунок 15), основанная на стандартной технологии, существующей в промышленности для проведения процесса пропитки статоров асинхронных электрических двигателей. Также определены оптимальные технологические параметры проведения операций.



Рисунок 16 – Пропитка статора электродвигателя



Рисунок 17 – Пропитка статора электродвигателя при воздействии ультразвука

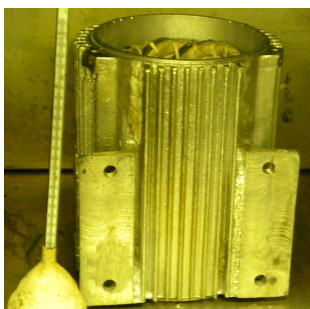


Рисунок 18 – Процесс сушки электродвигателя



Рисунок 19 – Статор электродвигателя с изоляцией модифицированной нитридом алюминия

Пятая глава посвящена описанию испытаний опытных образцов асинхронных электродвигателей. Проведенные испытания показали, что однократная пропитка статора асинхронного электродвигателя неотвержденным композиционным материалом «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» с дополнительным ультразвуковым воздействием, в сравнении с трехкратной пропиткой чистым электроизоляционным лаком КО-916К, позволяет добиться результирующего снижения нагрева обмотки статора до 15,8°С и увеличения КПД на 1,15%. На рисунках 16 – 19 приведены фотографии основных технологических операций: пропитка статора, выдержка при воздействии ультразвука, сушка, вид конечного продукта. Так же в этой главе проведена технико-экономическая оценка использования электроизоляционного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак КО-916К» и показано, что за счет увеличения срока службы и КПД асинхронных электродвигателей при применении композита, экономический эффект у потребителей в Уральском регионе может составить до 2,1 миллиардов рублей в год. Основные параметры, по которым производился расчет возможного экономического эффекта, приведены в таблице 8.

Таблица 8 – К расчету составляющей экономического эффекта от применения нитрида алюминия в технологии пропитки асинхронных двигателей

Наименование	Единица измерения	Величина
Суммарная мощность потребления в ОЭС Урала (по данным 2008 г.)	кВт×час	220×10^9
Мощность, потребляемая асинхронными двигателями мощностью до 100 кВт, напряжением до 1000 В	кВт×час	$79,2 \times 10^9$
Среднее увеличение КПД асинхронных двигателей при использовании нитрида алюминия.	%	0,5
Средняя стоимость 1 кВт×час для промышленных предприятий	руб.	2
Экономия электроэнергии за счет увеличения КПД асинхронных двигателей	кВт×час	396×10^6
Составляющая экономического эффекта от уменьшения электрических потерь при снижении рабочей температуры обмотки	млн. руб.	792
Доля асинхронных двигателей выводимых в капитальный ремонт	%	18
Доля асинхронных двигателей, выведенных в ремонт после модернизации	%	7,6
Установленная мощность асинхронных двигателей, по данным потребления в ОЭС Урала	кВт	$11,3 \cdot 10^6$
Сокращение эквивалентной мощности асинхронных двигателей, выводимых в капитальный ремонт в год, в результате увеличения срока службы изоляции	кВт	$1,175 \cdot 10^6$
Средняя удельная стоимость асинхронных двигателей до 100 кВт	руб./ кВт	1100
Составляющая экономического эффекта в результате увеличения срока службы изоляции при снижении рабочей температуры обмотки	млн. руб.	1289

Выводы

1. Результаты расчета показали, что агломерационной устойчивости в системе «нитрид алюминия – органический растворитель» можно достичь при размере частиц AlN более 0,8 мкм. Следовательно, для создания седиментационно-устойчивой системы, при введении в растворитель нитрида алюминия в исходном состоянии (размер агломератов ~5 мкм) в течение времени, необходимого на проведение технологических операций для пропитки статора асинхронного двигателя, требуется дополнительное внешнее воздействие в виде ультразвуковых колебаний или интенсивного

механического перемешивания, что было подтверждено экспериментальными результатами.

2. Результаты исследований показали, что для сохранения технологически приемлемого значения вязкости содержание наполнителя в композиционном материале не должно превышать 35 об.%. При содержании наполнителя до 20 об.% регулирование вязкости лучше производить путем добавления растворителя, а для высоконаполненных составов (более 30 об.%) предпочтительнее повышение температуры до значений, при которых еще не начинается процесс отверждения.

3. Повышенная теплопроводность неотвержденного композиционного материала «AlN – кремнийорганический лак» способствует получению более однородного объемного материала.

4. Введение нитрида алюминия приводит к улучшению электрофизических свойств кремнийорганического лака, за счет того, что электрический пробой в композиционном материале «нитрид алюминия – кремнийорганический лак» происходит по объему материала, а не по границе раздела фаз матрица – наполнитель.

5. Разработанная технология модифицирования нитридом алюминия электроизоляционных лаков позволяет сократить число операций в существующей технологии производства и улучшить рабочие характеристики асинхронных электродвигателей.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК.

1. Бекетов Д.А. Применимость современных моделей для оценки теплофизических характеристик композиций полимерный лак — нитридно-оксидная керамика [Текст] / Д.А. Бекетов, А.И. Ягупов, А.Р. Бекетов // Химическая технология. – 2009. – №7. – С. 396-400.

2. Взаимодействие нанопорошков оксида алюминия с водными и органическими средами [Текст] / Д.А. Бекетов, А.И. Ягупов [и др.] // Бутлеровские сообщения. – 2011. – Т.27, №12. – С. 24-30.

3. Взаимодействие нанопорошка нитрида алюминия с водными средами [Текст] / Д.А. Бекетов, А.И. Ягунов [и др.] // Бутлеровские сообщения. – 2011. – Т.27, №13. – С. 72-76.
4. Электрические характеристики композиционных материалов «органический электроизоляционный лак – нанооксиднонитридный модификатор» [Текст] / Д.А. Бекетов, А.И. Ягунов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия "Машиностроение". – 2011. – С. 85-89.
5. Теплопроводность полимерного композита AlN – лак КО-916к [Электронный ресурс] / Д.В. Грахов, А.И. Ягунов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 5. – URL: www.science-education.ru/99-4954.

Другие публикации по теме диссертации

6. Бекетов Д.А. Влияние добавок порошкообразного нитрида алюминия на вязкость полимерных материалов / Д.А. Бекетов, А.Р. Бекетов, А.И. Ягунов. – Керамика и композиционные материалы: материалы VI Всероссийской научной конференции. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2007. – С.11
7. Бекетов Д.А. Влияние добавок порошкообразного нитрида алюминия на теплопроводность полимерных материалов. / Д.А. Бекетов, А.Р. Бекетов, А.И. Ягунов – Керамика и композиционные материалы: материалы VI Всероссийской научной конференции. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2007. – С.11
8. Влияние добавок порошкообразного нитрида алюминия на теплопроводность полимерных материалов [Текст] / Д.А. Бекетов, А.И. Ягунов [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 157-162.
9. Красильников С.М. Моделирование свойств новых композиционных электроизоляционных материалов [Текст] / С.М. Красильников, Д.В. Грахов, А.И. Ягунов // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской

студенческой олимпиады 16-19 ноября 2009 г., научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых 14-18 декабря 2009. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 336-338.

10. Красильников С.М. Электрические характеристики композиционных материалов «органический электроизоляционный лак нанооксидо-нитридный модификатор» [Текст] / С.М. Красильников, А.Ю. Хлюпин, А.И. Ягупов // Научные труды XVIII Уральской международной конференции молодых учёных по приоритетным направлениям развития науки и техники. В 3 ч. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – Ч.3. – С. 51-55.

11. Опыт применения ультразвукового способа пропитки обмоток машин переменного тока с использованием нанооксидонитридных теплопроводящих наполнителей [Текст] / В.И. Денисенко, А.И. Ягупов [и др.] // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Сборник докладов 9 международной научно-практической конференции в рамках выставки «Энергетика и электротехника. Автоматизированные системы и приборостроение. Светотехника» 24 – 26 ноября 2010 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – С. 159-162.

12. Оценка влияния капсулирования лобовых частей статора с всыпными обмотками на нагрев и КПД асинхронных двигателей [Текст] / Денисенко В.И. , А.И. Ягупов [и др.] // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Сборник докладов 9 международной научно-практической конференции в рамках выставки «Энергетика и электротехника. Автоматизированные системы и приборостроение. Светотехника 24 – 26 ноября 2010 г.». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – С. 155-158.

13. Введение наномодифицированного лакокрасочного покрытия для защиты металлов от климатических факторов и механических воздействий [Текст] / П.В. Третьяков, А.И. Ягупов // Люльевские чтения: материалы седьмой научно-технической конференции ОАО «ОКБ «Новатор», 23-24 марта 2010 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 78-79.

14. Электрические характеристики композиционных материалов «органический электроизоляционный лак – нанооксидонитридный модификатор» [Текст] / Д.А. Бекетов, А.И. Ягунов [и др.] // Люльевские чтения: материалы седьмой научно-технической конференции ОАО «ОКБ «Новатор», 23-24 марта 2010 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 79.
15. К оценке ультразвукового способа пропитки обмоток машин переменного тока компаундами с теплопроводящими наполнителями [Текст] / М.В. Кычанов, А.И. Ягунов [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – С. 116 – 119.
16. Введение в пропиточный электроизоляционный лак нанооксидонитридного модификатора для повышения электрофизических параметров [Текст] / А.И. Ягунов [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – С. 272-276.
17. Оценка влияния капсулирования лобовых частей статора с выпными обмотками на технико-экономические показатели асинхронных двигателей [Текст] / В.И. Денисенко, А.И. Ягунов [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – С. 276-281.
18. О применении ультразвукового способа пропитки обмоток машин переменного тока с использованием нанооксидо-нитридных теплопроводящих наполнителей [Текст] / М.В. Баранов, А.И. Ягунов [и др.] //

Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – С. 281-288.

19. Исследование физико-химических свойств армированных пластиков, модифицированных оксидными добавками [Текст] / И.И. Шустов, А.И. Ягупов [и др.] // Люльевские чтения: материалы восьмой межрегиональной отраслевой научно-технической конференции ОАО "ОКБ "Новатор", 20-21 марта 2012 года. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 96-97.