

Повышение электрофизических параметров изоляционных пропиточных материалов является эффективным способом улучшения эксплуатационных свойств электротехнических устройств, применяемых в различных отраслях промышленности. Как показывают опубликованные данные [1], одним из путей повышения электрофизических параметров является введение в пропиточные лаки неорганических соединений с высокими электрофизическими характеристиками. Известны попытки применения таких модификаторов, как маршалит, нитрид бора, кварц, оксиды магния и бария, диоксид титана, карбид бора [2], в различные пропиточные лаки. Тем не менее, отсутствуют какие-либо сведения об использовании добавок нитрида алюминия. Эти материалы обладают уникальными свойствами: высоким удельным электросопротивлением и повышенным напряжением пробоя, высоким значением диэлектрической постоянной [3]. Эти материалы дополнительно обладают спектром уникальных характеристик. В частности, при высоком удельном электросопротивлении они имеют превосходную теплопроводность (до 300 Вт/мК в монокристаллическом состоянии) [3]. Электрофизические характеристики некоторых неорганических модификаторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрофизические характеристики модификаторов органических пропиточных электроизоляционных лаков [3, 4]

№	Модификатор	Диэлектрическая постоянная	Удельное электросопротивление, Ом•м	Электрическая прочность, кВ/мм
1	Оксид кремния (SiO ₂)	3,5-4,1	10 ¹² - 2	10,5-12
2	Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	10,5-12	3,2•10 ¹² - 20,3	3
3	Оксид магния (MgO)	8-9	10 ¹⁴ - 4	9
4	Нитрид алюминия (AlN)	9	> 10 ¹¹	30
5	Нитрид бора (BN)	3,6-4,2	1,7•10 ¹¹ - 6	4,2-3,25
6	Оксид бария (BaO)	4,2-3,25	- - 7	40,0-80,0
7	Диоксид титана (TiO ₂)	40,0-80,0	- - 8	6,3-7,1
8	Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	6,3-7,1	10 ¹¹ - 10 ¹²	-

Нитрид алюминия, полученный на опытно-промышленной установке кафедры редких металлов и наноматериалов УрФУ имеет теплопроводность 60-100 Вт/м•К и различный гранулометрический состав, начиная от 100 нм и до 5-10 мкм. Электротехнические устройства, как правило, работают при повышенных температурах, поэтому улучшение отвода тепла способствует их надежности и увеличению сроков эксплуатации. Следует также подчеркнуть, что практическое использование неорганических модификаторов требует проработки таких вопросов как коррозионно-эрозийной стойкости, определения теплофизических характеристик, адгезии по отношению к органическому электроизоляционному лаку. Нельзя обходить и чисто технологические вопросы: вязкости, устойчивости раствора во времени, наконец, характера распределения модификатора в объеме отвержденного органического электроизоляционного лака. Учитывая многостадийность необходимых исследований [5], в настоящей работе проведено определение электрофизических свойств композита «органический электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия». Для измерения характеристик удельного сопротивления материалов применялись специально приготовленные образцы в виде пленок содержащих различный

объемный процент нитрида алюминия толщиной 0,15-0,2 мм. Диаметр основного электрода 35 мм. Принципиальная схема установки для измерений удельных объемных и поверхностных сопротивлений плоских образцов представлена на рис. 1. Для определения характеристик электрической прочности и удельного сопротивления образцов использовались нормативы и рекомендации государственных стандартов и нормативных документов [6]. Испытательная установка состояла из источника постоянного регулируемого напряжения (ИПРН), который позволяет регулировать напряжение в пределах от 0 до 600 В, и переключателя П, предназначенного для изменения полярности напряжения, подводимого к образцу с измерительными электродами (рис. 1а). Схемы присоединения приборов и электродов на испытываемых образцах диэлектриков для определения ρ_v и ρ_s показаны на рис. 1б и рис. 1в. Рис. 1 – Принципиальная схема установки для измерения ρ_v и ρ_s : а - общая схема; б - схема присоединения электродов для определения ρ_v ; в - схема присоединения электродов для определения ρ_s

В виду того, что сопротивление изоляции из материалов даже с весьма неважными характеристиками имеет величину, которая при напряжении несколько сотен вольт ограничивает ток на уровне микро-, пикоампер и меньше, требуются измерители тока с очень большой чувствительностью или специальные методы измерения. На рисунке 1 также показана схема измерения тока, протекающего через диэлектрик с применением цифрового милливольтметра. Схема позволяет измерять падение напряжения на шунте с известным сопротивлением от тока, определяемого приложенным напряжением и сопротивлением изоляции. Величины сопротивлений шунта $R_{ш}$ и разделяющего резистора R многократно меньше измеряемого. Поэтому разницей напряжений на измерительных электродах образца и измеряемого на выходе источника ИПРН можно пренебрегать. Ток, протекающий через измеряемое сопротивление, определяется по формуле: $I = U_{ш} / R_{ш}$, где $U_{ш}$ – измеренное электронным прибором напряжение на шунте; $R_{ш}$ – установленная при этих измерениях величина сопротивления шунта. После измерения тока, протекающего через образец, при заданном напряжении определяется объемное сопротивление R_v образца и удельное объемное сопротивление ρ_v и соответственно поверхностное сопротивление образца R_s и удельное поверхностное сопротивление ρ_s по формулам: $R_v = U / I$; $\rho_v = R_v \cdot d$; $R_s = U / I$; $\rho_s = R_s \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)$, где S – площадь измерительного электрода 1; U_y – напряжение, подводимое к образцу, d – толщина образца; R_1 и R_2 – радиусы измерительного электрода 1 и экранирующего 3 соответственно. Геометрические размеры образцов подставляются в метрах. Атмосферные условия, особенно температура и влажность, а также чистота среды оказывают влияние на величины сопротивлений изоляции и удельные объемные и поверхностные сопротивления. По этой причине величины сопротивлений, приводимые в справочниках, относятся к нормальным атмосферным условиям (давление 760 мм рт. ст., температура воздуха 20°C, абсолютная влажность

воздуха 11 г/м³). Характеристики, полученные при измерениях, также приводятся к нормальным атмосферным условиям. Ввиду того, что токи через твердые диэлектрики при подключении к источнику постоянного напряжения устанавливаются, как правило, с задержкой по времени, поэтому электрические параметры определялись спустя несколько десятков секунд, как рекомендуется в нормативах. Для определения электрической прочности образцов применялась испытательная установка высокого переменного напряжения TuR-10 (10кВ), образцы помещались между электродами диаметром 60 мм образующими равномерное электрическое поле. Результаты эксперимента обрабатывались с применением статистических характеристик. Энергия пробоя определялась по формуле: $W = \frac{U \cdot Q}{N}$, где U – напряжение пробоя, кВ; Q – заряд, мкКл; N – количество образцов. Разброс данных характеризуется: σ . Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v отвержденной композиции «электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия» приведены в таблице 2. Таблица 2 – Результаты измерения удельного объемного сопротивления ρ_v и напряжения пробоя $U_{проб}$ композиции «органический электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия»

Состав композита (об% модификатора)	Удельное объемное сопротивление, (Ом•м)	Напряжение пробоя, (кВ/мм)
0 (чистый лак КО-916К)	3,0•10 ¹³	75
10	3,3•10 ¹³	102
30	3,4•10 ¹³	109

Приведенные данные наглядно свидетельствуют о том, что с ростом содержания нитрида алюминия увеличивается как объемное сопротивление, так и напряжение пробоя. Пробой образцов происходит на плоской поверхности образца, без консолидации в местах расположения частиц неорганического модификатора. Выводы 1. Анализ опубликованных данных свидетельствует о том, что введение неорганических модификаторов повышает электрофизические свойства пропиточных электроизоляционных лаков. 2. Практическое применение неорганических модификаторов определяется комплексом свойств: физико-химических и технологических. 3. Разработана и смонтирована установка для определения удельного объемного сопротивления композитов «электроизоляционный лак КО-916К – нитрид алюминия» 4. Показано, что введение нитрида алюминия улучшает электрофизические характеристики пропиточного электроизоляционного лака КО-916К.