

На правах рукописи

Журавлев Сергей Петрович

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ ИЗОЛЯЦИИ
ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2003

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Полонский Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Кучинский Георгий Станиславович

доктор физико-математических наук,
профессор Ханин Самуил Давидович

Ведущая организация: ОАО «НИИ «Гириконд»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «28» марта 2003 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.03 при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 325.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет К 212.229.03.

Автореферат разослан « 26 » февраля 2003 г.

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

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современной электротехники и электроэнергетики неразрывно связано с совершенствованием характеристик высоковольтных силовых конденсаторов (СК), ~ 70% выпуска которых предназначены для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока промышленной частоты. Указанные СК относятся к классу энергосберегающего оборудования и широко используются в различных сферах человеческой деятельности - от оборонной промышленности до медицинской техники. Мировой опыт производства и эксплуатации подобных устройств позволил сформулировать комплекс требований к электрофизическим характеристикам основного рабочего элемента конденсатора – его диэлектрической системе (ДС). В результате оптимальными электроизоляционными компонентами ДС были признаны полипропиленовая (ПП) пленка и экологически чистые газостойкие пропитывающие жидкости (в частности, фенилксиллилэтан - ФКЭ). Пленочный пропитанный диэлектрик (ППД) в условиях эксплуатации подвергается длительному воздействию электрического и теплового полей, а также механической нагрузки. Однако ароматическое строение пропитывающих жидкостей обеспечивает их повышенную газостойкость и устойчивость полипропиленовой изоляции (ППИ) к электрическому старению. В этих условиях (в отсутствии критических частичных разрядов - ЧР) наиболее серьезным недостатком, снижающим надежность и работоспособность ППД, а также СК в целом, является ухудшение электрофизических характеристик полипропиленовой пленки и ароматической жидкости вследствие постепенного растворения полимера в жидком диэлектрике (что предопределено их химическим составом и строением). Указанное взаимодействие компонентов ППИ имеет термоактивационную природу (то есть относится к процессам, состоящим из последовательности элементарных актов перегруппировки атомов или молекул с преодолением потенциальных барьеров) и реализуется, как набухание полипропиленовой пленки с последующим растворением преимущественно аморфной составляющей полимера и переходом содержащихся в ней ионов металлов, ионогенных примесей и технологических загрязнений в пропитывающую жидкость. Как следствие, имеют место необратимые структурные изменения ПП пленки (приводящие к снижению ее электрической и механической прочности), а также рост диэлектрических потерь жидкого диэлектрика. Оба фактора могут носить локальный, но ярко выраженный (а со временем – и лавинообразный) характер и способны привести к разрушению ППД.

Работы последних лет внесли коррективы в традиционный взгляд на условие совместимости твердых и жидких электроизоляционных материалов: получены сведения, указывающие на необходимость учета морфологических особенностей полимерной пленки. Установлено, что инновационным подходом к решению задачи снижения интенсивности взаимодействия компонентов конденсаторной ППИ может служить применение структурно

модифицированного полипропилена с высокоплотным транскристаллическим слоем (ТКС), наличие которого у поверхности диэлектрической пленки замедляет диффузию пропитывающей жидкости в объем полимера.

Однако данный факт во многом носит констатационный характер. Поэтому для повышения стабильности электрофизических свойств компонентов ППИ, а в дальнейшем – надежности и технико-экономических показателей высоковольтных силовых конденсаторов промышленной частоты, необходимы всесторонние исследования, развивающие физико-химические и электрофизические представления о взаимосвязи процесса термоактивационного растворения диэлектрической пленки в пропитывающей жидкости с морфологическими особенностями поверхности и объема полимерного материала. Это является, несомненно, актуальной задачей, как с научной точки зрения, так и с позиций выбора и эксплуатации электроизоляционной пленки оптимальной структуры. Причем указанное направление исследований представляется перспективным и практически полезным не только для силового конденсаторостроения, но и для иных областей науки и техники, в которых используются твердые полимерные материалы, контактирующие с химически активными жидкостями.

Косвенно актуальность работы подтверждается также и тем фактом, что ее часть, выполненная в рамках дипломного проектирования в 2000 году, награждена дипломом 1-ой степени Министерства образования Российской Федерации. Автор диссертации является победителем открытого конкурса на лучшую научную студенческую работу по естественным, техническим и гуманитарным наукам в ВУЗах России.

Цель работы. Изучить механизм разрушения полипропиленовой диэлектрической пленки различной морфологии в среде конденсаторных жидких диэлектриков и, на этой основе, выработать рекомендации по повышению термостабильности электрофизических свойств компонентов пленочной пропитанной изоляции силовых конденсаторов промышленной частоты.

Для достижения указанной цели представляется необходимым решить следующие задачи:

1. Разработать комплексную экспериментальную методику, обеспечивающую объективную оценку степени совместимости полимерных диэлектрических пленок и электроизоляционных жидкостей.

2. Изучить влияние структурных особенностей поверхности и объема полипропиленовой пленки на термостабильность электрофизических свойств компонентов ППИ.

3. Развить представления об инновационном подходе к решению проблемы совместимости взаимно растворимых твердых и жидких конденсаторных диэлектриков путем использования структурно модифицированной полимерной пленки с высокоплотным транскристаллическим слоем у поверхности электроизоляционного материала.

4. Разработать рекомендации по принципам выбора полипропиленовой пленки оптимальной, с точки зрения повышения надежности и работоспособности диэлектрической системы энергосберегающих конденсаторов, структуры.

Научная новизна.

1. Впервые разработана комплексная экспериментальная методика, базирующаяся на обоснованном выборе электрофизических и оптических критериальных характеристик, чувствительных к развитию взаимного растворения полипропилена и жидких диэлектриков, использование которой позволило провести многофакторное исследование влияния морфологических особенностей полимерной пленки на совместимость электроизоляционных компонентов ДС.

2. Экспериментально показано, что наличие искусственной шероховатости на поверхности полипропиленовой пленки (обеспечивающей качественную пропитку конденсаторных секций) способствует усилению нежелательного термоактивационного взаимодействия полимера с газостойкой ароматической пропиткой, особенно в случае присутствия в последней стабилизирующих добавок.

3. Установлено, что использование модифицированной полипропиленовой пленки (с высокоплотным транскристаллическим слоем столбчатой структуры у поверхности полимерного материала) позволяет стабилизировать диэлектрик с газостойкой пропиткой по параметрам $E_{пр}$ пленки и $\text{tg}\delta$ жидкости тем эффективнее, чем толще транскристаллический поверхностный слой, что вносит коррективы в традиционные представления об условиях совместимости твердых и жидких диэлектрических материалов.

4. Получены предварительные сведения, указывающие на наличие взаимосвязи между сроком службы полипропиленовых силовых конденсаторов промышленной частоты с газостойкой ароматической пропиткой ФКЭ и коэффициентом относительного светопропускания фенилксиллэтана на длине волны 610 нм ($K_{0.610}$), чувствительным к присутствию в жидком диэлектрике растворенного полипропилена.

5. Впервые экспериментально установлена взаимосвязь деформационных характеристик обычной и структурно модифицированной ПП пленок в исходном состоянии с кинетикой электрофизических свойств электроизоляционных компонентов диэлектрической системы СК в процессе термостарения.

Практическая значимость.

1. Разработана достоверная, экономически доступная и удобная в применении, в том числе в промышленных условиях, комплексная экспериментальная методика сравнительной оценки совместимости полимерной пленки и электроизоляционной жидкости на основе определения электрических, деформационных и оптических свойств компонентов ППД.

2. Показана перспективность решения задачи повышения кратковременной электрической прочности полимерного диэлектрика, а также стабилизации конденсаторной ППИ по параметрам $E_{пр}$ электроизоляционной пленки и $\text{tg}\delta$ пропитывающей жидкости путем использования структурно модифицированной ПП пленки с высокоплотным поверхностным транскристаллическим слоем.

3. Предложен простой и достоверный метод предварительной диагностики морфологических особенностей полипропиленовой пленки, основанный на исследовании ее деформационных характеристик в исходном состоянии.

4. Даны рекомендации по выбору ПП пленки оптимальной структуры, способствующей увеличению кратковременной электрической прочности полимерного материала в исходном состоянии и повышению термостабильности электрофизических свойств компонентов ППИ с газостойкой пропиткой, что позволяет прогнозировать увеличение срока службы изоляции высоковольтных силовых конденсаторов. Практическая значимость рекомендаций подтверждена актом об их использовании в ОАО «НИИ «Гириконд» (г. Санкт-Петербург) – одном из ведущих в стране предприятий конденсаторостроения.

5. Ряд результатов диссертационной работы, начиная с 2000 года, используется СПбГПУ в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 551300 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и инженеров по специальности 180300 «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» на факультетах: электромеханическом, вечернем электрорадиотехническом и открытого дистанционного образования. Помимо этого созданы и используются в учебном процессе:

- измерительная камера для лабораторных исследований жидких диэлектриков (федеральная дисциплина СД.03 «Химия и технология диэлектрических материалов»);

- лабораторная работа по изучению относительного светопропускания электроизоляционных жидкостей в световом диапазоне длин волн (специальная дисциплина «Методы испытания диэлектрических материалов»).

На защиту выносятся:

1. Интерпретация результатов исследования кинетики электрофизических свойств компонентов пленочного пропитанного диэлектрика, подтверждающих влияние структурных особенностей полипропиленовой пленки на интенсивность термоактивационных процессов, снижающих работоспособность силовых конденсаторов промышленной частоты.

2. Методика определения степени разрушения пленочного пропитанного диэлектрика, основанная на оценке коэффициента относительного светопропускания электроизоляционной жидкости в световом диапазоне длин волн.

3. Деформационный метод диагностики полипропиленовой пленки с целью выбора диэлектрического материала требуемой структуры.

4. Эмпирическое обоснование перспективности применения поверхностно модифицированной ТКС полипропиленовой пленки для повышения работоспособности ППИ силовых конденсаторов промышленной частоты.

5. Результаты сравнительного анализа термостабильности электрофизических свойств компонентов ППД, выполненного на основе вышеприведенных методических разработок, составляющих основу комплексной экспериментальной методики.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием современных методов измерения электрофизических и оптических характеристик исследуемых материалов; значительным количеством испытанных образцов; высокой степенью воспроизводимости статистически обработанных результатов; их соответствием фундаментальным представлениям и новейшим сведениям, приведенным в отечественных и зарубежных публикациях (в тех случаях, когда они имеются), а также использованием значительного числа методик, в том числе - внедряемых впервые, позволяющих всесторонне осветить изучаемую проблему.

Личный вклад автора определяется участием в постановке задачи исследований, в усовершенствовании и разработке ряда методик, а также состоит в проведении экспериментальных исследований; обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Все приведенные в работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. В процессе работы автор пользовался консультациями д.т.н. Андреева А.М., к.т.н. Журавлевой Н.М. и к.ф.-м.н. Мосейчука А.Г.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции «Изоляция-99» , Санкт-Петербург, 15-18 мая 1999 г.; 9-ой Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики – 2000), Санкт-Петербург, 17-22 сентября 2000 г.; 4-ой Международной конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (МКЭЭ – 2000), Клязьма, 18 - 22 сентября 2000 г.; V - ой Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», Санкт-Петербург, 8-9 июня 2001 г.; Научно-практической конференции и школе-семинаре «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий», Санкт-Петербург, 14-16 июня 2001 г.; Российской научно-практической конференции молодых специалистов «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники», Санкт-Петербург, 31 октября 2001 г.; VI - ой Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», Санкт-Петербург, 6-7 июня 2002 г.; III Международной конференции «Электрическая изоляция – 2002», Санкт-Петербург, 18-21 июня 2002 г.

Публикации. Опубликовано 17 печатных работ (из них 14 по теме диссертации).

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из списка основных сокращений и обозначений, введения, трех глав, заключения, списка литературы (189 наименований) и приложения (5 страниц). Диссертация выполнена на 204 страницах машинописного текста, содержит 84 рисунка и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, приведены основные научные и практические результаты исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ, отражающих современный взгляд на перспективные диэлектрики для высоковольтных силовых конденсаторов, а также, исходя из условий эксплуатации и основных воздействующих факторов, рассмотрены достоинства и недостатки электроизоляционных материалов, формирующих оптимальную (на сегодняшний день) полипропиленовую изоляцию СК, предназначенных для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока промышленной частоты. Проанализированы особенности механизма старения указанной ППИ, главной отличительной чертой которого является отсутствие корреляционной связи между скоростью старения и характеристиками начальных частичных разрядов, быстро «затухающих» вследствие повышенной газостойкости ароматических жидких углеводородов (в частности – фенилксилилэтана), применяемых в качестве экологически безопасных пропитывающих сред. Показано, что в подобных условиях существенно возрастает роль термоактивационных процессов: термоокислительной деструкции и взаимодействия твердых и жидких компонентов ППИ, обусловленного их химическим составом и молекулярным строением. Последнее обстоятельство до сих пор недооценивается и нуждается во всестороннем изучении. ПП и ФКЭ – взаиморастворимы, однако, именно ароматическое строение жидкого диэлектрика предопределяет его газостойкость (и повышенную устойчивость конденсаторного диэлектрика к электрическому старению). Поэтому, несмотря на, казалось бы, несовместимость твердых и жидких компонентов, ППИ указанного состава представляется наиболее перспективной, а исследования, направленные на поиск путей повышения ее работоспособности, – практически полезными. Анализ публикаций последних лет свидетельствует о возможности инновационного подхода к решению сформулированной проблемы, основанного на применении структурно модифицированной полипропиленовой пленки. Если рассматривать полимерный материал, как совокупность микрообъемов различной морфологии, то его кристаллические фрагменты более устойчивы к воздействию химически активных сред, чем аморфные. Поэтому использование электроизоляционной пленки с высокоплотным транскристаллическим слоем – ТКС (формирование которого для полипропилена возможно) у поверхности диэлектрика может способствовать снижению интенсивности термостимулированного взаимодействия компонентов ППИ. В связи с этим, в литературном

обзоре рассмотрены: вопросы формирования надмолекулярной структуры ПП (включая технологические аспекты); взаимосвязь морфологических особенностей поверхности и объема полипропиленовой пленки с ее основными электрофизическими свойствами и механическими характеристиками; конденсаторные пропитывающие жидкости и факторы, влияющие на степень совместимости твердых и жидких диэлектриков; транскристаллические структуры в ПП, а также способы формирования ТКС и полученные в последние годы сведения, позволяющие прогнозировать перспективность применения модифицированной полипропиленовой пленки в силовом конденсаторостроении. Аналитический обзор теоретических разработок и результатов экспериментальных исследований по рассматриваемой теме позволил выявить вопросы, требующие дальнейшего изучения, и сделать выводы, на основе которых сформулированы конкретные задачи настоящей диссертационной работы.

Вторая глава посвящена методическому обеспечению проводимых исследований. Так как в диссертационной работе рассматриваются вопросы термоактивационного взаимодействия компонентов конденсаторной ППИ с газостойкой пропиткой, то представлялось целесообразным уделить внимание именно тепловому старению, а в качестве критериальных характеристик выбрать параметры, достоверно отражающие степень разрушения диэлектрика при постепенном набухании и растворении полипропиленовой пленки в пропитывающей жидкости. Показано, что изучение кинетики электрофизических характеристик ($E_{пр}$ полимерной пленки, а также $\tan\delta$ и D пропитывающей жидкости, где D - коэффициент дестабилизации, количественно отражающий степень роста диэлектрических потерь жидкого диэлектрика при развитии вышеназванных термоактивационных процессов) необходимо, но недостаточно для достижения цели работы (вследствие неоднозначности трактовки причин изменения указанных параметров). Поэтому теоретически (с привлечением основ коллоидной химии и теории рептации) обоснована перспективность использования в качестве дополнительной характеристики, достоверно фиксирующей присутствие растворенного полимера в жидком диэлектрике, коэффициента относительного светопропускания жидкости (K_{oc}). Приведена методика определения K_{oc} жидких диэлектриков в диапазоне длин волн (425 – 610) нм.

Даны описания: конкретных методов исследования электрофизических характеристик твердых и жидких диэлектриков; измерительной аппаратуры; степени воспроизводимости полученных результатов и методов их статистической обработки.

Представлены факты, подтверждающие целесообразность сравнительного анализа относительного разрывного удлинения (ϵ_p) полимерных пленок в исходном состоянии с целью выявления их морфологических различий. Изложены методы определения ϵ_p и последующей статистической обработки полученных результатов путем построения полигона частот реализации конкретных значений исследуемого параметра, применение которого позволяет связать деформационные свойства полимерного материала с особенностями его структуры.

В третьей главе приведены основные экспериментальные результаты, их анализ и обсуждение, а также даны рекомендации по выбору полипропиленовой пленки оптимальной (с точки зрения повышения работоспособности ППИ СК промышленной частоты) структуры, сформулированные на основе испытания промышленных образцов ПП пленок, проведенного с применением разработок настоящего исследования.

В первом разделе экспериментальной части содержатся сведения об объекте исследования, который представлял собой модельные образцы пропитанных гладких и шероховатых полипропиленовых пленок различной морфологии: опытной сферолитной структуры (завод «Пластик»; Москва); двухосноориентированной - ТУ 619-057-65-87 (Луцкого химического комбината) и «Bolloré» (Франция), а также модифицированной ТКС – «Bolloré» (Франция). ПП с ТКС отличался наличием высокоплотного транскристаллического слоя столбчатой структуры у поверхности пленки. В качестве пропитывающих электроизоляционных жидкостей использовались газостойкие ароматические углеводороды: фенилксилилэтан (ФКЭ) – «Nisseki Condenser Oil S» фирмы «Nippon Petrochemical Co» (Япония), степень ароматичности которого $K_a=75\%$, и моно-дибензилтолуол (М/ДБТ) – «Jarylec C101» фирмы «Prodelek» (Франция), $K_a=85,7\%$. Выбор перечисленных импортных жидких диэлектриков указанных марок обусловлен их широким использованием в настоящее время в отечественном конденсаторостроении.

Второй раздел главы 3 посвящен разработке метода оценки интенсивности термоактивационных процессов в ППД на основе кинетики коэффициента относительного светопропускания (K_{oc}) пропитывающей электроизоляционной жидкости. Установлено (рис. 1), что развитие термоокислительных процессов приводит к снижению светопропускания фенилксилилэтана на длине волны 425 нм (K_{oc425}), тогда как присутствие в пропитывающей среде растворенного полипропилена фиксируется снижением K_{oc610} : после удаления ПП из ФКЭ фильтрацией светопропускание жидкости на длине волны 610 нм возросло на 45%.

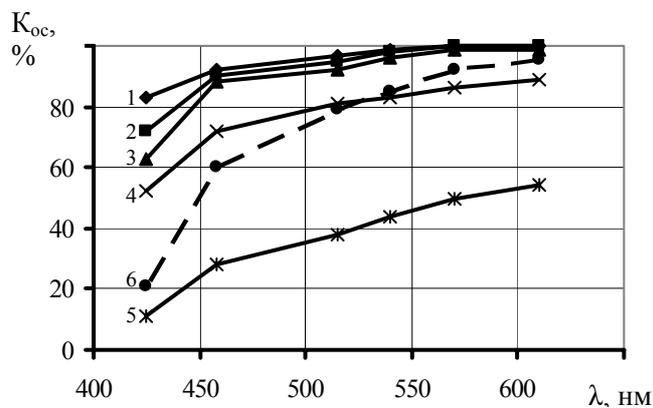


Рис. 1. Зависимости K_{oc} ФКЭ от длины световой волны (λ). Режим термостарения (при 100°C): 1 – без ПП пленки ($\tau=400$ ч); 2 – без ПП пленки ($\tau=500$ ч); 3 – без ПП пленки ($\tau=600$ ч); 4 – в контакте с ПП ($\tau=600$ ч); 5 – в контакте с ПП до полного растворения пленки; 6 – образец №5 после фильтрации

Аналогичный эффект был получен и для М/ДБТ, более интенсивно (по сравнению с ФКЭ) растворяющего ПП вследствие повышенной ароматичности. Далее на модельных образцах состава ПП – М/ДБТ проводилась отработка температурного режима испытаний с целью предотвращения агрегирования и выпадения в осадок растворенного полимера (приводящих к повышению

светопропускания жидкой среды и существенно искажающих результаты эксперимента). Было установлено, что в случае повторных измерений K_{oc610} пробы жидкого диэлектрика с растворенным ПП при температуре жидкости (80-100)°С коэффициент вариации не превышал (1,5 – 3) %.

Результаты исследования проб фенилсилилэтана «Nisseki Condenser Oil S», изъятых из высоковольтных силовых конденсаторов марок КЭК-3,15-100У1 и КЭФ-1,05-50У1 (производства ОАО «Серпуховский завод конденсатор КВАР»), прошедших ресурсные испытания в Научно-исследовательском институте постоянного тока (НИИПТ, г. Санкт-Петербург), показали значительное снижение K_{oc610} жидкого диэлектрика из конденсаторов с небольшим временем до отказа, в то время как K_{oc610} ФКЭ из конденсатора, проработавшего 6750 часов и отключенного без пробоя секций, снизился всего на 2% по сравнению с эталоном (ФКЭ в исходном состоянии). Установлено наличие корреляционной связи между коэффициентами D и K_{oc610} (рис. 2).

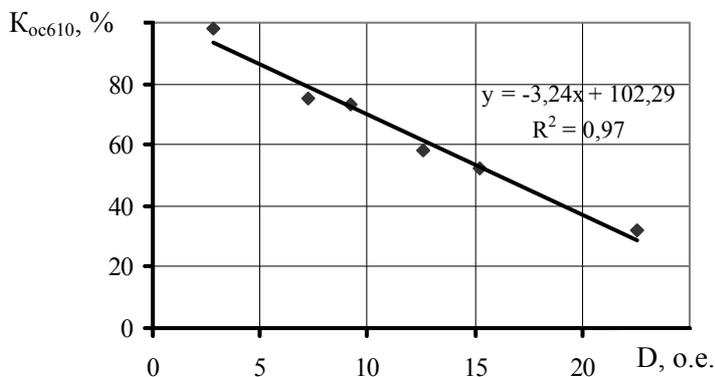


Рис. 2. Корреляционная зависимость между коэффициентами дестабилизации (D) и относительного светопропускания для проб ФКЭ, изъятых из промышленных силовых конденсаторов КЭФ 1,05-50У1 и КЭК-3,15-100У1

Основной причиной выхода из строя каждого конкретного ППД могли быть и значительный рост $tg\delta$ жидкости, и локальное снижение электрической прочности полимерной пленки, обусловленные растворением ПП в ароматическом жидком диэлектрике. Снижение K_{oc610} пропитывающей жидкости свидетельствует о развитии этого процесса и в определенной степени отражает работоспособность ППИ в целом.

Третий раздел экспериментальной части диссертационной работы посвящен исследованию влияния морфологических особенностей поверхности полипропиленовой пленки и присутствия стабилизаторов в пропитывающей жидкости на интенсивность их взаимодействия. Изучалась кратковременная электрическая прочность гладкой и шероховатой ПП пленок «Bolloge» (толщиной 10 мкм), пропитанных фенилсилилэтаном «Nisseki Condenser Oil S» (без стабилизатора и с эпоксисодержащими добавками). Определение $E_{пр}$ указанных пленок после 150 часов термостарения (при температуре 100°С) в среде ФКЭ обоих типов дало близкие результаты (в пределах разброса значений), не выявив существенных различий между электроизоляционными материалами. В то же время значения составляющей коэффициента дестабилизации – D'' (представляющего собой отношение $tg\delta$, измеренного при 100°С, жидкости после термостарения в контакте с полимерной пленкой к ее аналогичной характеристике после термостарения без пленки) для ФКЭ с эпоксисодержащими добавками в среднем на 10% превысило D''

нестабилизированного ФКЭ, что свидетельствует о повышении интенсивности взаимодействия компонентов ППИ при введении в жидкий диэлектрик указанного стабилизатора. Этот вывод подтверждается и результатами определения оптических характеристик обеих жидкостей: диаграмма изменения $K_{\text{осб10}}$ ФКЭ (рис. 3) иллюстрирует максимальное снижение светопропускания жидкого диэлектрика (в среднем на 22 % по сравнению с исходным состоянием, принятым за 100 %) в случае введении стабилизатора и использования шероховатой пленки.

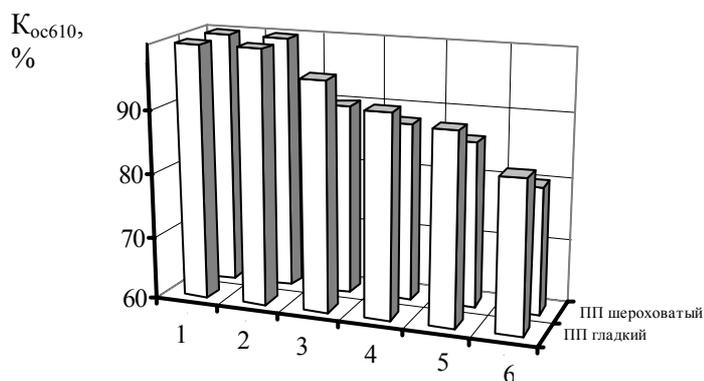


Рис. 3. Диаграмма изменения $K_{\text{осб10}}$ ФКЭ.

Исходное состояние: 1 – нестабилизированный; 2 – стабилизированный; Состаренный с ПП: 3 – нестабилизированный ($\tau=100$ ч); 4 – стабилизированный ($\tau=100$ ч); 5 – нестабилизированный ($\tau=150$ ч); 6 – стабилизированный ($\tau=150$ ч)

Учитывая эффекты, рассмотренные в трудах академика П.А. Ребиндера и его научной школы, можно предположить, что поверхность шероховатой пленки (с микрокапиллярной системой, искусственно созданной с целью обеспечения качественной пропитки пленочных конденсаторных секций) локально ослаблена и поэтому имеется вероятность существования таких неоднородностей, при проникновении в которые пропитывающая жидкость (особенно стабилизированная) оказывает расклинивающее воздействие, ускоряющее процесс растворения полимера. Хотя полученные результаты имеют предварительный характер и нуждаются в глубоком изучении с позиций электрофизики и коллоидной химии, тем не менее они представляют практический интерес, так как свидетельствуют о неоднозначной роли стабилизаторов.

В четвертом разделе третьей главы исследовалось влияние структурных особенностей поверхности и объема полипропиленовой пленки на ее кратковременную электрическую прочность ($E_{\text{пр}}$). Пробивное напряжение оценивалось при помощи установки УПУ-10 с электродной системой шар (диаметром 6 мм) – плоскость. На рис. 4 приведены значения $E_{\text{пр}}$ опытных образцов ПП пленок сферолитной структуры (1 и 2), величина которых практически совпадает с литературными сведениями (работы С.П. Колесова) об электрической прочности межсферолитного (аморфного) пространства полипропилена, что свидетельствует о преимущественном развитии канала пробоя по аморфным включениям полимерного материала. С ростом диаметра сферолитов ($L_{\text{сф}}$) и толщины пленки $E_{\text{пр}}$ снижается из-за уменьшения плотности аморфной фазы. Двухосная ориентация способствует повышению электрической прочности полимерного материала (3). Наличие искусственной шероховатости – ее некоторому снижению (4). Для модифицированных плёнок (5) $E_{\text{пр}}$ увеличивается с ростом толщины материала, что может

быть связано с усилением «барьерного» эффекта, так как толщина ТКС была больше у образцов ПП большей толщины. В среднем $E_{пр}$ модифицированной полипропиленовой пленки с ТКС в 1,2 – 1,7 раз выше, чем обычной, при близких значениях степени кристалличности.

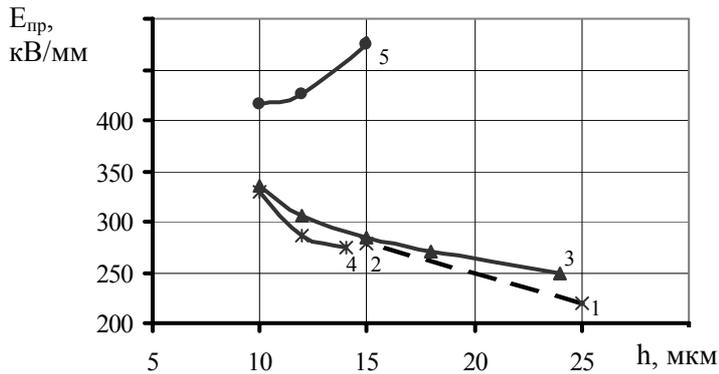


Рис. 4. Зависимости $E_{пр}$ от толщины (h) ПП пленок различной структуры.

1, 2 – сферолитная (1 – $L_{сф}=220$ мкм; 2 – $L_{сф}=140$ мкм); 3 – двухосно-ориентированная гладкая; 4 – шероховатая; 5 – модифицированная ТКС

Далее (в пятом разделе) изучалось влияние особенностей структуры полипропиленовой пленки на изменение электрофизических характеристик компонентов конденсаторного ППД в процессе термостарения (при температуре 100°C). Было установлено, что кинетические зависимости кратковременной электрической прочности (рис. 5) немодифицированных ПП пленок имеют максимум (обусловленный двумя встречными процессами: заполнением микротрещин и пустот полимерного материала жидким диэлектриком и растворением преимущественно аморфных областей ПП пленки в пропитывающей ароматической жидкости).

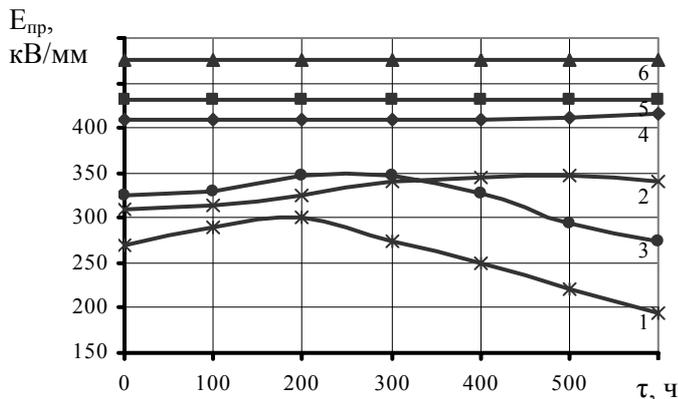


Рис. 5. Зависимости $E_{пр}$ ПП пленок от времени термостарения (при 100°C) в среде ФКЭ.

Опытные: 1 – ПП с $L_{сф}=220$ мкм, $h_{ср}=24$ мкм; 2 – ПП с $L_{сф}=140$ мкм, $h_{ср}=15$ мкм. 3 – ПП ТУ 619-051-615-87, $h_{ср}=10$ мкм; ПП «Bolloré» с ТКС: 4 – $h_{ср}=10$ мкм; 5 – $h_{ср}=12$ мкм; 6 – $h_{ср}=15$ мкм

В то же время $E_{пр}$ ПП пленок с ТКС практически не изменилось. В этом случае не обнаружено влияния пленки и на $\text{tg}\delta$ жидкости ($D''=1$), тогда как при термостарении ФКЭ с пленками обычной морфологии D'' возрос в 3 – 6 раз из-за «вымывания» в жидкость (вместе с аморфной составляющей полимера) содержащихся в ней примесей и загрязнений. $K_{ос610}$ ФКЭ, отделенного от ПП пленок с ТКС, составлял 100% после 600 часов термостарения, то есть растворения полимера не происходило, тогда как для случая контакта жидкости с немодифицированными пленками (особенно неориентированными), $K_{ос610}$ снизился на 15-20%. Попытка трактовки этого эффекта может быть сделана на основе положений теории репаций. Предполагается, что при растворении полимерного материала характер движения макромолекулы из объема к поверхности – змееподобен. Тогда высокоплотный кристаллический слой столбчатой структуры может препятствовать не только проникновению жидкости в пленку, но и

перемещению полимерных макромолекул в жидкость. Со временем, из-за неизбежного наличия микродефектов в ТКС, возможно локальное разрушение защитного слоя. Тем более интенсивное, чем выше степень ароматичности жидкости. Это предположение подтверждено результатами определения K_{oc610} ФКЭ и М/ДБТ при термостарении жидкостей (в течение 140 часов при 100°C) в контакте с модифицированным ПП: K_{oc610} М/ДБТ - снизился на 35%, а ФКЭ не изменился. Таким образом, структурная модификация ПП пленки ТКС способствует не только повышению ее электрической прочности, но и стабилизации ППД по параметрам: $E_{пр}$ пленки; $tg\delta$, D и K_{oc610} жидкости.

В разделе шесть третьей главы изучалось влияние структуры полипропиленовой пленки на ее деформационные характеристики. Определялось относительное разрывное удлинение (ϵ_p) модифицированной ТКС (1) и двухосноориентированной (2) ПП пленок в исходном состоянии. Для каждой пленки было испытано по 50 образцов. Полученные результаты статистически обрабатывались методом построения полигона частот реализации конкретных значений исследуемого параметра. «Размытость» полигона ϵ_p немодифицированной ПП пленки (рис. 6) можно объяснить наличием сквозных аморфных включений (которые и определяют степень эластичности полимерного материала).

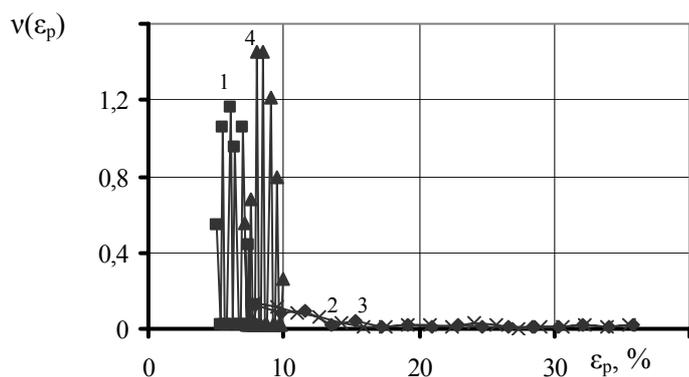


Рис. 6. Частота появления конкретных значений относительного разрывного удлинения ПП пленок различной структуры.

1 – модифицированная ТКС; 2 – двухосноориентированная немодифицированная; 3 – ПП «Terfilm»; 4 – ПП «Bollore» (3, 4 – структура неизвестна).

ПП пленка с ТКС имела четко выраженные уровни деформации и разрушалась с минимальным удлинением, обусловленным наличием высокоплотного транскристаллического слоя столбчатой структуры у поверхности полимерного материала.

Представленные в разделах 2 - 6 третьей главы результаты, полученные на путем изучения электрофизических, оптических и реологических свойств компонентов пленочного пропитанного диэлектрика на основе полипропиленовых пленок различной морфологии, были использованы в седьмом разделе третьей главы работы при исследовании промышленных образцов указанного полимерного материала с неизвестной структурой. Изучались гладкие и шероховатые ПП пленки «Bollore» (Франция) и «Terfilm» (Финляндия). При определении относительного разрывного удлинения испытывалось по 100 образцов на каждую пленку. На рис. 6 приведены полигоны частот ϵ_p гладких ПП пленок «Terfilm» (3) и «Bollore» (4), сравнительный анализ которых с полигонами ϵ_p пленок известной структуры (двухосноориентированной и с ТКС - рис. 6) позволил

предположить наличие упрочняющего кристаллического слоя у полимерного материала французского производства.

Далее были определены кинетические зависимости $E_{пр}$ (на которых каждая точка – среднее из 30 значений для 3-х партий образцов) указанных пленок при термостарении в течение 300 часов при температуре 100°C в среде экологически чистых жидких диэлектриков: нефтяного конденсаторного масла и фенилсилилэтана «Nisseki Condenser Oil S». Наблюдалась тенденция незначительного (4 – 7%) роста с последующей стабилизацией $E_{пр}$ шероховатых пленок (особенно «Terfilm») в среде нефтяного масла, что может быть связано с «залечиванием» неоднородностей и ограниченным набуханием полимерного материала. K_{oc610} пропитывающей среды в этом случае составлял 100% в течение всего времени испытаний, то есть растворения не происходило (нефтяное масло и ПП - химически совместимы). При термостарении в среде ФКЭ (рис. 7) для ПП пленок «Terfilm» отмечался ярко выраженный максимум из-за диффузии жидкости в пленку, заполнения пустот полимерного материала и постепенного растворения аморфной фазы ПП.

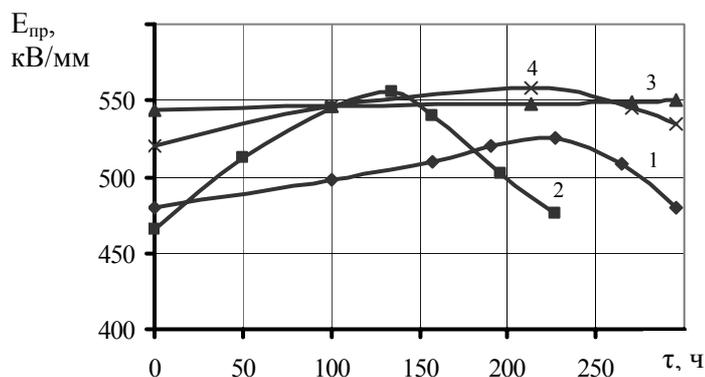


Рис. 7. Кинетика кратковременной электрической прочности образцов ПП пленок ($h_{ср}=10$ мкм), состаренных (при 100°C) в контакте с ФКЭ.

1 – гладкая «Terfilm»; 2 – шероховатая «Terfilm»; 3 – гладкая «Bollore»; 4 – шероховатая «Bollore»

Снижение $E_{пр}$ шероховатой пленки начиналось через 140 часов старения - значительно раньше, чем гладкой. Термостабильность шероховатой полипропиленовой пленки «Bollore» и гладкой «Terfilm» - близки: спад $E_{пр}$ фиксируется практически одновременно (в среднем – через 220 часов термостарения). Для гладкой пленки «Bollore» через 300 часов испытаний зафиксировано лишь незначительное увеличение $E_{пр}$, свидетельствующее о вероятном проникновении ароматической жидкости в пленку. Анализ проб ФКЭ, отделенных от ПП пленок «Terfilm» (шероховатой и гладкой), а также от шероховатой пленки «Bollore», показал, что K_{oc610} жидкости постепенно снижался практически сразу после начала испытаний, следовательно, растворение полипропилена развивалось одновременно с «залечиванием» дефектов пленки. Для ФКЭ, отделенного от гладкой ПП пленки «Bollore», обнаружено незначительное снижение светопропускания (на 2-3%) лишь к концу испытаний, что свидетельствует о значительном превосходстве указанной пленки перед остальными. Кроме того, было установлено, что начало спада $E_{пр}$ ПП пленок 1, 2 и 4 (из-за необратимых изменений структуры материала вследствие растворения полимера в ФКЭ) соответствует снижению K_{oc610} жидкого диэлектрика в среднем на 20%. Таким образом, время, за которое K_{oc610} пропитывающей жидкости снижается на 20% (в ходе

термостарения с полимерным материалом), можно использовать в качестве критериального параметра ($\tau_{кр}$) для сравнительной оценки работоспособности конденсаторных полипропиленовых пленок, а относительное разрывное удлинение полимерного материала в исходном состоянии - для диагностики его структурных особенностей с целью обеспечения термостабильности электрофизических характеристик компонентов ППИ.

Основные выводы и результаты работы.

1. Установлено, что коэффициент относительного светопропускания (K_{oc}) конденсаторных газостойких пропитывающих жидкостей ФКЭ и М/ДБТ, измеренный на длине волны 610 нм, чувствителен к присутствию растворенного полипропилена. Выявлена взаимосвязь K_{oc610} экологически чистой газостойкой жидкости фенилксилилэтан с изменением ее $tg\delta_{100^\circ C}$ и коэффициента дестабилизации при термостарении, а также со сроком службы силовых полипропиленовых конденсаторов промышленной частоты с аналогичной пропиткой. Анализ изменения K_{oc610} позволил получить дополнительные факты, подтверждающие негативное влияние термоактивационного взаимодействия компонентов конденсаторного ППД на его работоспособность.
2. Выявлено, что время снижения K_{oc610} ФКЭ на 20% ($\tau_{кр}$) соответствует началу падения кратковременной электрической прочности ПП пленки вследствие необратимых изменений ее структуры при частичном растворении в пропитывающей жидкости и этот параметр (наряду с $E_{пр}$ полимерной пленки и коэффициентом дестабилизации жидкого диэлектрика – D , отражающим интенсивность термоактивационного взаимодействия компонентов пленочного пропитанного диэлектрика) может быть использован в качестве критериального при проведении сравнительных испытаний термостабильности ППИ с целью выбора ее оптимального состава.
3. Показано, что модификация полипропиленовой пленки путем формирования приповерхностной высокоплотной кристаллической области столбчатой структуры позволяет повысить кратковременную электрическую прочность полимерного материала тем значительнее, чем больше толщина пленки и указанного транскристаллического слоя (ТКС). При этом модифицированная пленка в исходном состоянии превосходит по $E_{пр}$ пленку обычной морфологии (соответствующей толщины) в среднем в 1,2-1,7 раза.
4. Расширены представления о роли морфологических особенностей поверхности и объема полимерного материала, как о факторах, влияющих на интенсивность взаимодействия компонентов пленочно-пропитанной изоляции силовых конденсаторов. Показано, что термостабильность диэлектрика «полипропилен-фенилксилилэтан» при замене ПП пленки обычной структуры на модифицированную с ТКС возрастает в (1,5-1,7) раза по параметру $E_{пр}$ и в 4 раза по параметру D . В то же время установлено, что наличие искусственной шероховатости на поверхности полимерного материала активизирует взаимное растворение ПП и ФКЭ в среднем в

1,5 раза (по параметру $\tau_{кр}$) по сравнению с диэлектриком идентичного состава на основе гладкой ПП пленки.

5. Обнаружен неоднозначный характер влияния эпоксисодержащих добавок на диэлектрические потери фенилксилилэтана. Значения $\text{tg}\delta_{100^\circ\text{C}}$ стабилизированной жидкости до и после термостарения в среднем на 15% ниже, чем нестабилизированной; однако величина коэффициента дестабилизации (D) на 10% выше. Полученные результаты указывает на необходимость более полных исследований при выборе стабилизаторов электроизоляционных пропитывающих жидкостей.

6. Впервые показана взаимосвязь деформационных характеристик ПП пленки в исходном состоянии с кинетикой электрофизических свойств компонентов ППИ. Установлены статистически достоверные, структурно предопределенные различия полигонов частот реализации конкретных значений ϵ_r пленок, модифицированных ТКС и традиционной структуры, которые могут быть использованы для диагностики морфологических особенностей полимерного материала.

7. Разработана комплексная методика (с использованием критериальных параметров: $E_{пр}$, и ϵ_r полимерной пленки, а также $\text{tg}\delta$, D, $K_{ос610}$ и $\tau_{кр}$ пропитывающей жидкости), применение которой позволило выявить различия (по термостабильности электрофизических свойств) ППД на основе ПП пленок разных производителей, как минимум, в 1,5 раза. Указанное заключение подтверждено совпадением деформационных характеристик опытной ПП пленки с ТКС и лучшей из исследованных полипропиленовых пленок промышленного производства, что дает основание предположить наличие упрочняющего кристаллического слоя в последней. Рекомендации по выбору полимерного диэлектрика оптимальной структуры были использованы в ОАО «НИИ «Гириконд» (что подтверждено актом использования, приведенным в диссертации).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Будникова Н.В., Журавлев С.П. Кратковременная электрическая прочность конденсаторной полипропиленовой пленки с транскристаллической поверхностью // XXVIII Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской науч. конф. Ч. 1. Санкт-Петербург, 6-11 декабря 1999 г. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – С. 70-71.

2. Журавлев С.П., Мосейчук А.Г. Влияние морфологии поверхностного слоя полипропиленовой пленки на работоспособность пропитанного диэлектрика // XXVIII Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской науч. конф. Ч. 1. Санкт-Петербург, 6-11 декабря 1999 г. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – С. 71-72.

3. Оценка работоспособности конденсаторного пленочного диэлектрика по изменению относительного светопропускания пропитывающей жидкости / А.М. Андреев, С.П. Журавлев, Н.М. Журавлева, А.Г. Мосейчук // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2000): Тез. докл. девятой международной конф. Т. 2. Санкт-Петербург, 17-22 сентября 2000 г. – СПб.: РГПУ, 2000. – С. 105.

4. Модификация поверхностных слоев пленки как средство стабилизации диэлектрической системы полипропиленовых конденсаторов с газостойкой пропиткой / А.М. Андреев, М. Евтич, С.П. Журавлев, Н.М. Журавлева // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2000): Тез. докл. девятой международной конф. Т. 2. Санкт-Петербург, 17-22 сентября 2000 г. – СПб.: РГПУ, 2000. – С. 103-104.

5. К вопросу о совместимости органических диэлектриков / А.М. Андреев, М. Евтич, С.П. Журавлев, Н.М. Журавлева // Электротехника, электромеханика и электротехнологии (МКЭЭ - 2000): Труды IV международной конф. Клязьма, 18-22 сентября 2000 г. – М.: МЭИ, 2000. – С. 80-81.

6. Журавлев С.П., Мосейчук А.Г. Влияние модификации структуры поверхностных слоев пропитанной полипропиленовой пленки на свойства конденсаторного диэлектрика // Научно-технические ведомости СПбГТУ. - 2000. - № 4 (22). - С. 116-119.

7. Журавлев С.П., Смирнова В.В. Диагностика пленочно-пропитанного диэлектрика оптическими методами // XXIX Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской науч. конф. Ч. 1. Санкт-Петербург, 27 ноября -2 декабря 2000 г. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 69-70.

8. Журавлев С.П., Смирнова В.В. Разработка метода оценки совместимости компонентов диэлектрической системы // XXIX Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской науч. конф. Ч. 1. Санкт-Петербург, 27 ноября -2 декабря 2000 г. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 70-71.

9. Журавлев С.П. К вопросу о диагностике конденсаторных диэлектрических систем на основе полимерных пленок с газостойкой пропиткой // Электротехника. - 2001. - №6. - С. 40-45.

10. Журавлев С.П., Полонский Ю.А. Эффект стабилизации диэлектрической системы полипропиленовых конденсаторов с газостойкой пропиткой // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы V Всероссийской конф. по проблемам науки и высшей школы. Санкт-Петербург, 8-9 июня 2001 г. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 150-151.

11. Инновационное решение проблемы совместимости взаиморастворимых компонентов диэлектрических систем высоковольтных силовых конденсаторов / А.М. Андреев, М. Евтич, С.П. Журавлев, Н.М. Журавлева, Ю.А. Полонский // Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий: Материалы научно-практической конф. и школы-семинара. Санкт-Петербург, 14-16 июня 2001 г. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 16-19.

12. Журавлев С.П., Полонский Ю.А. К вопросу об электрической прочности конденсаторной полипропиленовой пленки // Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники: Материалы Российской научно-практической конф. молодых специалистов. Санкт-Петербург, 31 октября 2001 г. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 89-90.

13. Термостабильность конденсаторной полипропиленовой изоляции / А.М. Андреев, М. Евтич, С.П. Журавлев, Н.М. Журавлева // Электрическая изоляция – 2002: Труды третьей международной конф. Санкт-Петербург, 18-21 июня 2002 г. – СПб.: СПбГТУ, 2002. - С. 189-190.

14. Журавлев С.П., Журавлева Н.М., Полонский Ю.А. Деформационные характеристики полипропиленовой пленки и термостабильность конденсаторной изоляции на ее основе // Электротехника. - 2002. - №11. - С. 36-40.