

На правах рукописи



Резник Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ КОМПОНЕНТОВ
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПУТЕМ
СТРУКТУРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ БУМАГИ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Кизеветтер Дмитрий Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Техника высоких напряжений,
электроизоляционная и кабельная техника» «Санкт-
Петербургского политехнического университета
Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Официальные оппоненты:

Таджибаев Алексей Ибрагимович

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Диагностика и управление техническим
состоянием энергетического оборудования»
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения дополнительного
профессионального образования «Петербургский
энергетический институт повышения квалификации»
(ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»);

Высогорец Светлана Петровна

кандидат технических наук, главный специалист
ПАО «Межрегиональная распределительная сетевая
организация Северо-Запада» («МРСК Северо-
Запада»).

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Всероссийский
научно-исследовательский проектно-конструкторский
и технологический институт кабельной
промышленности» (ОАО «ВНИИКП», г. Москва).

Защита состоится « 28 » ноября 2017 г. в _____ часов в _____ ауд. Главного корпуса «СПбПУ» на
заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» www.spbstu.ru

Автореферат разослан «_____» октября 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.16

к.т.н., доцент



Журавлева Наталия Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования В современном мире жизнедеятельность и развитие цивилизованных стран обеспечиваются надежным функционированием энергосистем, фундаментальными, неотъемлемыми и весьма дорогостоящими элементами которых являются силовые трансформаторы (СТ) и кабели. В связи с особенностями экономического положения нашей страны спрос на СТ в России диктуется не только постоянным ростом потребления электроэнергии, но и требованиями по замене устаревшего оборудования, большая часть которого, согласно статистическим данным, исчерпала свой ресурс. Потребность в резервных единицах трансформаторной техники (для обеспечения бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей различной степени ответственности) усугубляет дефицит указанных высоковольтных объектов. Поэтому на практике допустимое время эксплуатации трансформаторов определяется не столько Нормативными документами, сколько их фактическим состоянием, которое зависит от комплекса факторов, включая вероятное возникновение режимов короткого замыкания (КЗ).

Специалистами указывается, что среди наиболее значимых причин отказов СТ лидирует старение бумажно-пропитанной изоляции (БПИ), которая до настоящего времени в данной области силовой техники остается базовой (и по-прежнему находит широкое применение в кабельной промышленности) несмотря на ряд существенных недостатков. Хорошо известно, что жидкий диэлектрик (в отечественных СТ чаще всего нефтяное трансформаторное масло - ТМ) наиболее подвержен деструкции в процессе эксплуатации БПИ. В масле постепенно накапливаются продукты разрушения компонентов изоляции, формируется (и осаждается на конструктивных элементах и бумаге) шлам. Как следствие, растут электропроводность и диэлектрические потери, нарушается теплоотвод, возрастает интенсивность термоокислительных процессов. Сорбционная очистка пропитывающей жидкости электроизоляционной бумагой (ЭИБ), особенно модифицированной активными адсорбентами, позволяет несколько замедлить развитие негативных явлений. Однако вполне очевидно, что для снижения риска внезапных отказов необходим достоверный мониторинг состояния компонентов изоляции и своевременная замена ТМ (при достижении предельно допустимых значений его критериальных параметров). Таким образом, ресурс БПИ, а во многом и трансформатора в целом, преимущественно определяется старением целлюлозной электроизоляционной бумаги (ЭИБ), отличающейся низкой нагревостойкостью. Сохраняя практически неизменными свои диэлектрические характеристики (такие как: $\operatorname{tg}\delta$, $E_{\text{пр}}$, ρ_v , ρ_s , ϵ), ЭИБ постепенно теряет механическую прочность вследствие химических (в частности, снижение средней степени полимеризации - СП) и структурных превращений целлюлозной основы материала, что особо опасно в случае воздействия динамических нагрузок при возникновении КЗ (непредсказуемость которых делает прогноз ресурса БПИ и СТ трудновыполнимой задачей).

В указанных условиях особое значение приобретает проблема повышения работоспособности силовых трансформаторов, а также – усовершенствования методов их диагностики (с целью

предотвращения техногенных инцидентов). Решению перечисленных актуальных и практически значимых задач может способствовать: расширение представлений о предельном состоянии целлюлозных диэлектриков; оптимизация состава БПИ путем разработки электроизоляционных видов бумаги нового поколения (отличающихся высокими эксплуатационными характеристиками, повышенной нагревостойкостью и сорбционной активностью), а также – повышение эффективности мониторинга трансформаторного масла, чему и посвящена диссертационная работа.

Цель работы На основе сравнительных экспериментальных исследований (с использованием оптических методов диагностики) произвести оценку совместимости широко применяемых и перспективных жидких диэлектриков с новыми видами электроизоляционной бумаги, модифицированной структурообразующими биополимерами, расширить представления о факторах, влияющих на нагревостойкость электроизоляционной бумаги, и выработать рекомендации по увеличению срока службы компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции.

В рамках указанной цели представляется необходимым решение следующих **задач**:

1. Путем экспериментальных исследований изучить целесообразность широкого использования в базовой бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов перспективных для отечественного трансформаторостроения жидких пожаробезопасных диэлектриков.

2. Провести сравнительные испытания и дать заключение об интенсивности шламообразования в отечественных трансформаторных нефтяных маслах в условиях контакта с электроизоляционной бумагой при каталитическом влиянии медных проводников.

3. На основе анализа действующих критериев нагревостойкости ЭИБ и сравнительных испытаний электрофизических характеристик традиционных и опытных видов целлюлозного диэлектрика исследовать влияние структурообразующих природных биополимеров (отличающихся сродством к целлюлозе) на работоспособность компонентов БПИ.

4. Расширить представления об оптических методах диагностики и эффективности их использования для текущего контроля состояния изоляции силовых трансформаторов.

5. Сформулировать рекомендации по повышению ресурса компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции.

Научная новизна работы

1. В результате впервые проведенных исследований предложен способ и показана целесообразность модификации целлюлозной основы электроизоляционной бумаги структурообразующим хитин-глюкановым природным комплексом (ХГК), способствующей повышению электрофизических и механических свойств ЭИБ, а также – нагревостойкости компонентов бумажно-пропитанной изоляции (заявка № 2016149477, приоритет от 15.12.2016).

2. Путем сопоставления химических, механических и оптических характеристик электроизоляционной бумаги впервые показана эффективность неразрушающего спектрально-корреляционного метода оценки степени деградации целлюлозных диэлектриков.

3. Выявлено положительное влияние пропитывающей жидкости на основе натурального эфира MIDEL eN на предел механической прочности электроизоляционной бумаги в процессе теплового старения, что может быть связано с полимеризацией компонентов жидкости и влечет за собой упрочнение целлюлозной основы.

4. На основе сравнительных исследований жидких диэлектриков MIDEL и нефтяных трансформаторных масел показано, что применение в составе бумажно-пропитанной композиции синтетической жидкости MIDEL 7131 на основе сложных эфиров приводит к снижению интенсивности старения БПИ на 1,5-порядка.

5. Доказана и обоснована повышенная работоспособность ЭИБ с низкой СП целлюлозы.

6. Впервые выявлена повышенная нагревостойкость бумаги из 100 % бактериальной целлюлозы (БЦ) по сравнению с ЭИБ традиционного исполнения, а также – с композитом из промышленной электроизоляционной целлюлозы сосны и БЦ.

7. Впервые экспериментально продемонстрировано, что использование размола нано-гель-пленки бактериальной целлюлозы промышленным блендером для формирования основы ЭИБ из указанного биополимера приводит к росту электрической и механической прочности бумаги.

8. Разработано устройство (патент РФ на полезную модель №141304, G01N 21/25, опубл. в 27.05.2014 г. Устройство для оперативного контроля качества технического масла), позволяющее расширить пределы измерения оптических характеристик жидкостей в видимом диапазоне длин волн.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработан способ повышения работоспособности компонентов бумажно-пропитанной изоляции путем модификации целлюлозной основы ЭИБ природным структурообразующим хитин-глюкановым комплексом (ХГК) из многотоннажных промышленных отходов производства лимонной кислоты, что имеет экологическую составляющую и позволяет более полно использовать природные ресурсы.

2. Экспериментально показана эффективность нового способа дезинтеграции нано-гель-пленки бактериальной целлюлозы (НГП БЦ), разработанного ИВС РАН, путем её размола блендером вместо традиционного роспуска в ролле Валлея (который затруднен морфологическими особенностями сырья), открывающего перспективы промышленного использования биополимера для производства целлюлозных диэлектриков с улучшенными электрофизическими характеристиками.

3. Предложена программа, позволяющая дать количественную оценку степени шламообразования в жидком диэлектрике действующего трансформатора на основе видеоинформации, в частности, полученной в ходе непрерывного мониторинга при помощи волоконно-оптического осветителя [патент РФ №122187].

4. Проведена оценка и дано заключение о совместимости отечественных трансформаторных масел с ЭИБ и медными проводниками, которая использована при разработке новых жидких диэлектриков.

5. Получены дополнительные сведения, расширяющие представления о перспективах использования пожаробезопасных жидких диэлектриков MIDEL в отечественном силовом трансформаторостроении и о возможности их совмещения с нефтяными маслами.

6. Показана и обоснована возможность эксплуатации ЭИБ с пониженной степенью полимеризации, что расширяет ресурс БПИ и, как следствие, СТ в целом (при условии мониторинга состояния изоляции), что подтверждается отдельными наблюдениями практиков.

7. Даны рекомендации по расширению контролируемых параметров при диагностике электроизоляционных масел оптическими методами, применение которых может способствовать повышению информативности и достоверности заключения о текущем состоянии БПИ.

8. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» ИЭиТС «СПбПУ», а также при проведении работ по совершенствованию свойств применяемых и разработке новых диэлектриков.

Методология и методы диссертационного исследования

Исследования базируются на сравнительном анализе электрических, механических, химических и оптических характеристик компонентов бумажно-пропитанной изоляции в процессе ускоренного термостарения в контакте с каталитически активными медными проводниками; принятых и разработанных методиках обработки и количественной оценки экспериментальных результатов, а также визуальном их подтверждении с использованием сканирующей электронной микроскопии.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- результаты испытаний перспективной электроизоляционной бумаги повышенной работоспособности, изготовленной с применением разработанного способа получения ЭИБ с улучшенными характеристиками путем модификации целлюлозной основы структурообразующим биополимером из отходов производства лимонной кислоты;

- интерпретация результатов экспериментальных исследований новых видов диэлектрических материалов, подтверждающих возможность получения и эффективность применения целлюлозных диэлектриков на основе нано-гель-пленки бактериальной целлюлозы, отличающихся повышенными электрофизическими свойствами и нагревостойкостью;

- сравнительные результаты испытания диэлектрических свойств и устойчивости к шламообразованию при термостарении в присутствии медного катализатора, а также - совместимости с целлюлозной бумагой жидких диэлектриков различной химической природы, включая перспективные для отечественного силового трансформаторостроения;

- эмпирическое обоснование возможности использования ЭИБ с пониженной степенью полимеризации макромолекул целлюлозы и экспериментальные результаты, подтверждающие необходимость пересмотра принятых критериальных оценок предельного состояния целлюлозного компонента высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции;

- рекомендации по расширению информативности и достоверности диагностики БПИ силовых трансформаторов путем применения неразрушающих оптических методов контроля.

Реализация результатов работы Результаты диссертационной работы использованы в ООО «Техноцентр» (Ярославская область) и ООО «ЭлекТрейд-М» (г. Москва) для оценки совместимости электроизоляционной бумаги и технических масел, а также в учебном процессе кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. (Акты использования прилагаются к диссертации).

Достоверность полученных результатов подтверждается применением совокупности дополняющих друг друга электрофизических, механических, химических и оптических методов оценки состояния изучаемых компонентов БПИ (некоторые из которых разработаны или использованы впервые), включая сканирующую электронную микроскопию; высокой степенью воспроизводимости и корректной статистической обработкой повторно полученных экспериментальных результатов; их корреляцией с фундаментальными представлениями, а также современными литературными сведениями отечественных и зарубежных источников по теме исследования.

Личный вклад автора определяется участием в постановке цели и задач диссертационной работы; разработкой, а также усовершенствованием ряда методик; проведением экспериментальных исследований; обработкой и анализом результатов, которые получены и обобщены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы Материалы работы обсуждались на 21-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербург - 2014, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Санкт-Петербург – 2016, 2017 гг.); Международной научно-практической конференции «ELEKTRO 2016», (Словакия, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «10th Electric Power Quality and Supply Reliability Conference», (Таллинн, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering», (Рига, 2016 г.); Международной научной конференции «Федоровская сессия 2016», (Санкт-Петербург, 2016 г.); VII конференции молодых специалистов инженерно-технических подразделений ПАО «Силовые машины» (Санкт-Петербург, 2016 г.).

Публикации По теме диссертации опубликовано **18** печатных работ, в их числе: 3 статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ; 1 патент РФ на полезную модель; 7 публикаций в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных SCOPUS и Web of Science, а также 1 учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ.

Структура и объем диссертационной работы Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, библиографического списка (172 источника), а также приложения. Основная часть работы изложена на 182 страницах, содержит 144 рисунка и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы и сведения о степени ее разработанности; определены цель, задачи и методы исследования; раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ, отражающих мировую тенденцию роста энергопотребления, а также – ужесточения требований к развитию и повышению надежности энергосистем, одним из ключевых элементов которых (как в РФ, так и за рубежом) являются силовые трансформаторы с базовой бумажно-пропитанной изоляцией, потеря работоспособности которой статистически обоснованно признана одной из основных причин отказов СТ. Проанализированы современные представления о структуре, достоинствах и недостатках, а также - механизмах деструкции традиционных и перспективных твердых и жидких диэлектриков, как компонентов БПИ. Показаны особенности их старения в процессе эксплуатации (основным воздействующим фактором которого в данном случае является температура): стабильность электрических характеристик целлюлозной бумаги (ЦБ) при одновременном снижении средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы (Ц) и механической прочности материала, а также постепенное ухудшение диэлектрических свойств жидкости, сопровождающееся шламообразованием (что негативно сказывается на твердой изоляции и затрудняет теплоотвод). Сделано и обосновано заключение о том, что в указанных условиях и вследствие непредсказуемости возникновения КЗ мерами по повышению работоспособности СТ могут служить как совершенствование методов диагностики состояния изоляции (включая непрерывный мониторинг для своевременной замены жидкого диэлектрика), так и внедрение диэлектрических материалов нового поколения, отличающихся, в частности, повышенной нагревостойкостью и устойчивой совместимостью с учетом каталитического влияния медных проводников. Последнему моменту в специальной литературе уделяется недостаточно внимания, несмотря на появление широкой линейки новых синтетических и натуральных жидких диэлектриков. На основе изучения теоретических разработок, результатов экспериментальных исследований и обобщенных наблюдений практиков сформулировано положение о сомнительности принятых критериальных параметров предельного состояния целлюлозных диэлектриков, а также о необходимости поиска путей эффективной модификации целлюлозной основы электроизоляционной бумаги структурообразующими компонентами, отличающимися средством к целлюлозе, что может способствовать решению основной задачи диссертационной работы – повышению термостабильности компонентов БПИ и, как следствие, работоспособности высоковольтного оборудования, в котором используется указанный вид изоляции.

Вторая глава посвящена описанию методического обеспечения работы. Объектом исследования были выбраны опытные (модифицированные) и промышленные (в качестве прототипа) образцы ЭИБ; широко используемые минеральные масла российского производства, а также

перспективные для отечественного трансформаторостроения пожаробезопасные жидкости MIDEL (Великобритания): синтетический сложный эфир MIDEL 7131 и натуральный эфир MIDEL eN. Приведены описания: режимов ускоренного термостарения; методов определения электрофизических, физико-химических и механических характеристик жидких и твердых диэлектриков, а также нагревостойкости целлюлозных материалов; схемы установок и измерительных приборов. Показано, что для повышения степени информативности и достоверности получаемой оценки состояния изоляционной системы СТ традиционные комплексные методы диагностики компонентов БПИ целесообразно дополнить оптическими (неразрушающими) методами контроля. Приведено описание устройства, расширяющего возможности оценки оптических характеристик технических жидкостей различной химической природы (разработанного и запатентованного, как полезная модель, в рамках данной диссертационной работы). Представлена блок-схема установки (рис. 1) и дано описание впервые использованного применительно к целлюлозным диэлектрикам неразрушающего спектрально-корреляционного метода исследования, основанного на регистрации распределений интенсивности рассеянного образцом излучения различных длин волн, а также статистических закономерностей их изменения. Спекл-картины изучаемых объектов, полученные при помощи экспериментальной установки, фиксировались телевизионной камерой, обрабатывались ПК, сопоставлялись с химическими и механическими

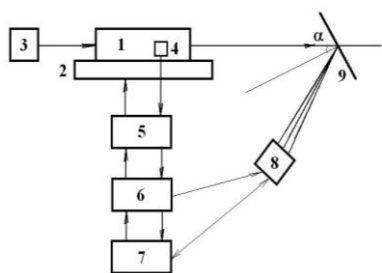


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:
 1 – лазер; 2 – элемент Пельтье;
 3 – блок питания;
 4 – датчик температуры;
 5 – блок управления;
 6 – блок синхронизации;
 7 – ПК; 8 – ПЗС ТВ камера;
 9 – исследуемый образец

характеристиками образцов ЭИБ, а также подтверждались «SEM-кадрами» состояния целлюлозных волокон, полученными при помощи сканирующего электронного микроскопа.

Традиционные методы статистической обработки полученных результатов дополнены авторской программой, обеспечивающей количественную оценку содержания механических частиц и шлама в жидком диэлектрике. Методика основана на определении площади, занятой указанными фрагментами на фотоснимке пробы жидкости (полученного при помощи увеличительной техники и видеокамеры), и в перспективе может быть использована для оценки скорости шламообразования при непрерывном мониторинге состояния жидкого диэлектрика в СТ.

В третьей главе представлены результаты исследований традиционно используемых в СТ нефтяных масел и пожаробезопасных диэлектрических жидкостей линейки MIDEL (перспективных для отечественного трансформаторостроения), а также их смесей; анализ и обсуждение полученных экспериментальных сведений. В первом разделе указанной главы приведены сравнительная оценка диэлектрических свойств (в исходном состоянии), а также нагревостойкости и совместимости (в процессе ускоренного термостарения) указанных электроизоляционных жидкостей с ЭИБ и медными проводниками.

Подтверждено превосходство минеральных масел над жидкостями MIDEЛ по показателям $\text{tg}\delta$ и ρ_v . Однако более высокая рабочая температура и температура вспышки последних предполагает их использование на объектах повышенной ответственности. В тоже время изучение динамики коэффициента относительного светопропускания (K_{oc} , %) проб жидкости на длине волны $\lambda = 458$ нм (по 5 измерений на точку, эталон - глицерин), которое проводилось с целью оценки степени их совместимости с ЭИБ и медными проводниками, выявило крайне негативное влияние меди на MIDEЛ eN (рис. 2). Было зафиксировано интенсивное снижение $K_{oc 458}$ жидкости и отсутствие сорбционной

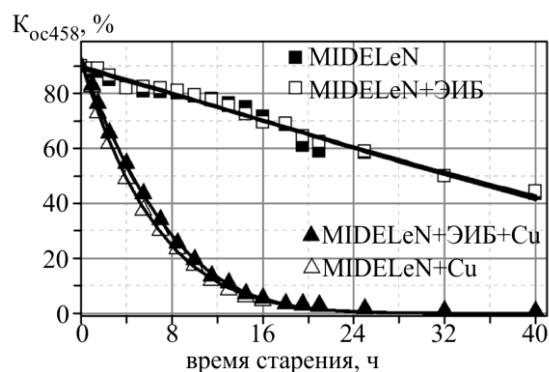


Рис. 2. Зависимости $K_{oc 458}$ проб MIDEЛ eN от времени термостарения при температуре 140°C

активности у целлюлозной бумаги: замедления снижения светопропускания MIDEЛ eN при контакте с ЭИБ (вследствие очистки пропитывающей среды бумагой) не наблюдалось. Отсутствие указанного эффекта можно объяснить полимеризацией натурального эфира (косвенно подтвержденной аномальным ростом механической прочности (в 1,8 раза) образцов промышленной ЭИБ марки К140 после термостарения).

Исследование смесей нефтяного масла марки ГК и синтетической жидкости MIDEЛ 7131 проводилось для оценки перспектив их совместного использования, что представляет практический интерес с точки зрения совершенствования свойств электроизоляционных пропитывающих сред. Было установлено, что добавка (до 10 %) MIDEЛ 7131 к нефтяному маслу способствует стабилизации ρ_v смеси при термостарении, не приводя к значительному росту её $\text{tg}\delta$ по сравнению с аналогичной характеристикой минерального диэлектрика. Однако рост $K_{oc 458}$ проб смеси с увеличением концентрации MIDEЛ 7131 (отличающегося высоким светопропусканием по сравнению с нефтяным маслом) при одновременном увеличении $\text{tg}\delta$ композиции указывает на ограниченную применимость оптических методов исследования при испытаниях жидкостей MIDEЛ. Далее изложены результаты испытаний двух проб ТМ марки ГК. Термостарение первой из них проводилось при удвоенном содержании медного катализатора для обеспечения повышенной скорости разрушения масла с целью отработки предложенного автором метода количественной оценки интенсивности термоокислительной деструкции компонентов БПИ и шламообразования, что в перспективе может быть практически полезным при диагностике состояния изоляции СТ (включая непрерывный мониторинг). На рис. 3 представлены микрофотографии (400x) указанных проб масла в процессе термостарения (параллельно с определением их $K_{oc 458}$ фиксировалось по 5 – 10 кадров на точку), а на рис. 4 – пример количественной оценки шламообразования в них. Предложенная методика позволяет регистрировать появление мелких частиц шлама, их постепенную агрегацию с последующим выпадением в осадок. Выбор уровней интенсивности освещения влияет на точность оценки: чем он выше, тем больше мелких фрагментов учитывается – процентное содержание шлама увеличивается (рис. 4 б).

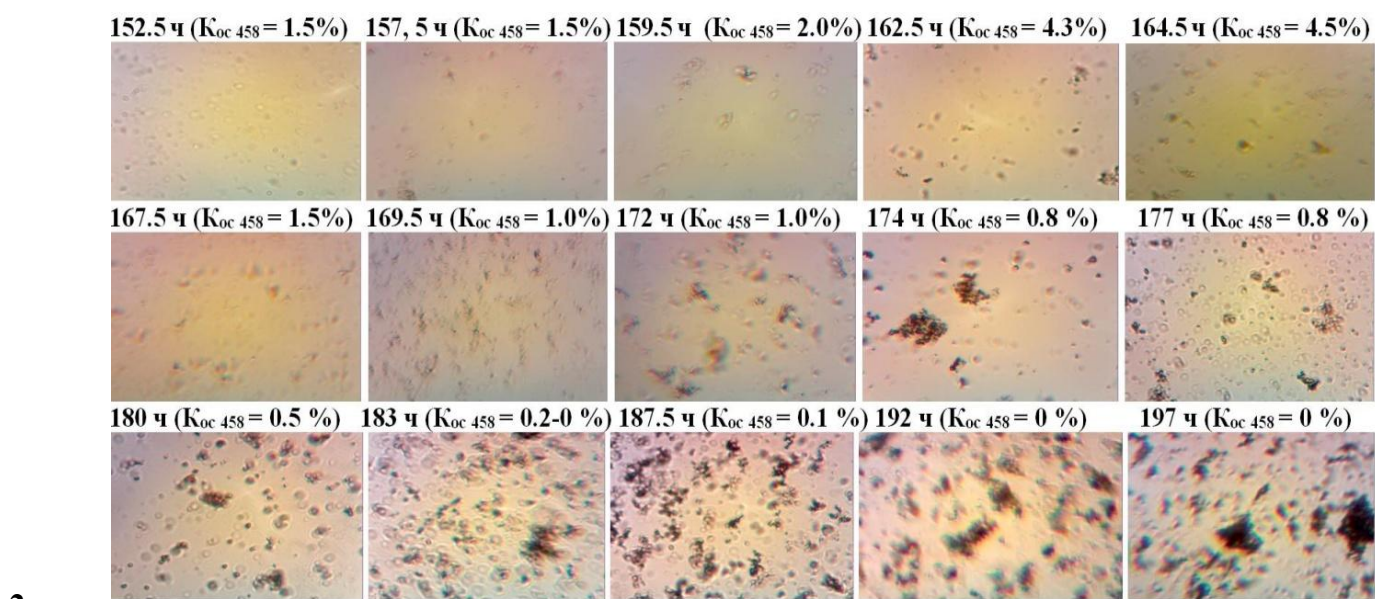
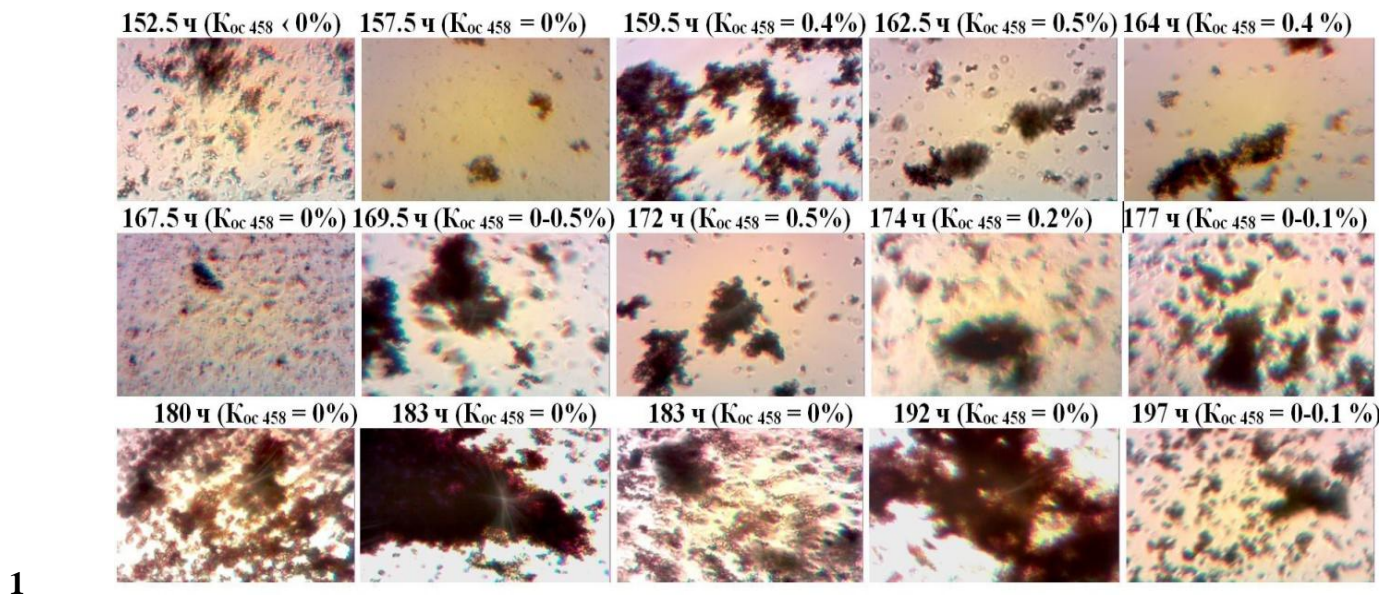


Рис. 3. Микрофотографии (400 х) проб нефтяного масла марки ГК в процессе термостарения при температуре 140°С: при повышенном (1) и пониженном в 2 раза содержании с медного катализатора (2)

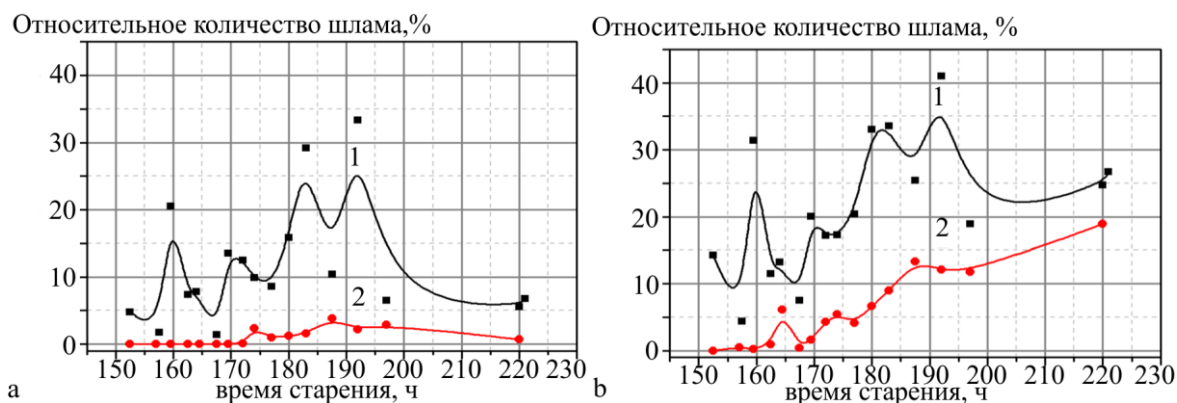


Рис. 4. Количественная оценка содержания шлама в пробах масла ГК в процессе термостарения при повышенном (1) и пониженном в 2 раза (2) содержании медного катализатора: а – 0,5 I_{cp} ; б – 0,75 I_{cp} (где I_{cp} – средний уровень интенсивности освещения)

Второй раздел третьей главы посвящен описанию результатов экспериментальных исследований нефтяных трансформаторных масел (ТМ) марок ГК тц, Т-1500у тц и ТКп тц, изготовленных ООО «ТЕХНОЦЕНТР». В качестве эталона при сравнительных испытаниях совместимости указанных ТМ с медными проводниками и ЭИБ использовались синтетическая жидкость MIDEL 7131 и ТМ марки ГК иного производителя. Определение диэлектрических свойств жидкостей в исходном состоянии выявило некоторое превосходство масла Т-1500у тц над остальными ТМ ярославского производства (табл.1).

Таблица 1.

Средние значения диэлектрических характеристик нефтяных масел

Тип жидкости	$\text{tg}\delta_{90^\circ\text{C}}$	$\rho_v 90^\circ\text{C}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$E_{\text{пр ср}}, \text{кВ/мм}$	$K_{\text{вар}}, \%$
ГК тц	$0,0016\pm 0.0003$	$2,4\cdot 10^{12}$	11,7	4,1
Т-1500у тц	$0,0006\pm 0.0001$	$2,4\cdot 10^{12}$	14,3	8,1
ТКп тц	$0,0039\pm 0.0008$	$1,6\cdot 10^{11}$	10,9	3,2

Сравнительная оценка интенсивности термостарения при температуре 140°C (которая проводилась путем изучения динамики снижения $K_{\text{oc } 458}$ проб жидкостей) ожидаемо выявила максимальную стойкость к окислительным процессам синтетического диэлектрика MIDEL 7131. Устойчивость к термовоздействию масел ярославского производства (за исключением ТКп тц) оказалась близкой к эталону – ТМ ГК иного производителя. Поэтому для дальнейшей оценки совместимости с ЭИБ марки К 140 было выбрано масло ТМ Т-1500у тц, как относительно лучшее (по предварительным показателям) среди жидкостей ярославского производства.

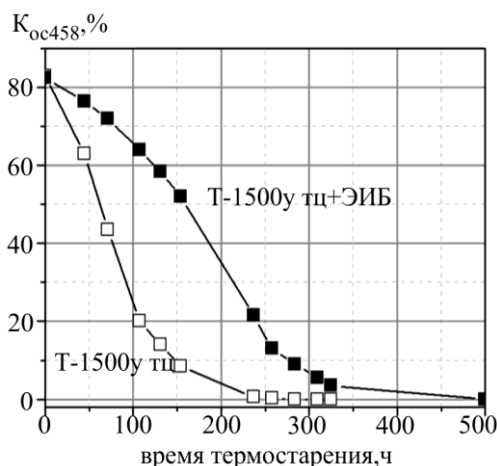


Рис. 5. Зависимости $K_{\text{oc } 458}$ проб ТМ марки Т-1500у тц от времени термостарения

Динамика снижения коэффициента относительного светопропускания проб указанного ТМ от времени термостарения в контакте с медным катализатором («Cu»), с ЭИБ и без неё (рис. 5), а также визуальный анализ состояния фрагментов ЭИБ (выполненный при помощи увеличительной техники) и шламообразования в масле (дополненный применением разработанной методики количественной оценки содержания механических частиц) подтвердили наличие сорбционной активности целлюлозного материала по отношению к рассматриваемому ТМ. В указанном случае имело место замедление деструктивных процессов: светопропускание ТМ при контакте с ЭИБ оказалось существенно выше – рис. 5. В тоже время визуальное исследование фрагментов бумаги выявило их частичное разрушение, а также присутствие в масле «осколков» ЭИБ, чего не наблюдалось при проведении аналогичного испытания (в идентичных условиях) в среде эталона - ГК иного производителя. Установленный факт свидетельствует о необходимости совершенствования состава масел с позиции повышения степени совместимости с электроизоляционной целлюлозной бумагой.

Четвертая глава содержит разработки и результаты экспериментальных исследований, целью которых являлось повышение работоспособности БПИ путем оптимизации состава по волокну и модификации ЭИБ структурообразующими природными компонентами (отличающимися сродством к целлюлозе). Структурирование целлюлозной основы предполагало возможность улучшения таких показателей ЭИБ, как: электрическая и механическая прочность, нагревостойкость и сорбционная активность (увеличение которой способствует замедлению деструкции компонентов БПИ).

Первый раздел главы содержит результаты изучения степени обоснованности критериальных параметров предельного состояния целлюлозного волокна, а также влияния средней степени полимеризации (СП) макромолекул электроизоляционной целлюлозы (ЭИЦ) на работоспособность ЭИБ. Оптимальной считается ЭИЦ с исходной $СП_0 = 1200$ ед., а оценка текущего значения СП признана важным диагностическим методом, широко используемым для прогноза ресурса БПИ. Принято, что при достижении целлюлозой некой критической величины – $СП_{кр}$ (значение которой не обосновано и существенно колеблется в различных рекомендациях) ЭИБ разрушается. Считается, что в указанном случае механическая прочность бумаги падает до значений, при которых наступает предел физического существования материала. За критериальный показатель принимается снижение характеристики на 50 % от исходного значения ($P_{p50\%}$), а при сравнительных испытаниях различных ЭИБ сопоставляется время достижения указанного предельного значения прочности ($\tau_{P50\%}$).

С целью изучения данного вопроса были отобраны 2 образца ЭИБ из ЭИЦ сосны (исходная СП которых различалась в 2 раза: №1 – $СП_{01} = 1208$ ед., №2 – $СП_{02} = 618$ ед.), а также образец ЭИБ из

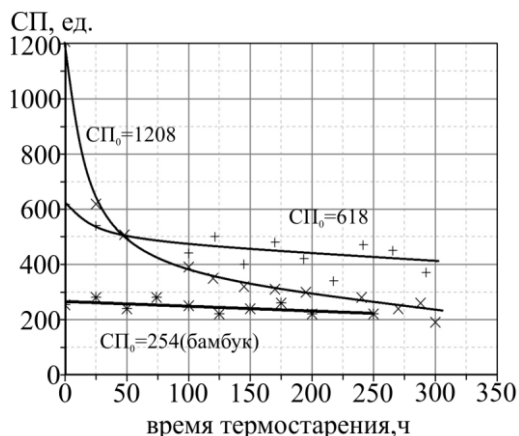


Рис. 6. Зависимости средней степени полимеризации от времени термостарения для ЭИБ с различной $СП_0$

целлюлозы бамбука, исходная СП которого составляла 254 ед. ($СП = 200-250$ ед. в ряде рекомендаций указывается, как $СП_{кр}$). Предварительная оценка кратковременной электрической прочности материалов не выявила влияния $СП_0$ на характеристику (так как пробой бумаги развивается преимущественно по воздушным включениям). В ходе ускоренного термостарения (которое проводилось при температуре $140^{\circ}C$ и свободном доступе воздуха) снимались зависимости СП (по 3 значения на точку) от времени термостарения – τ (рис. 6). Одновременно только для образцов ЭИБ из ЭИЦ сосны (вследствие недостаточного

количества бумаги из бамбука) определялись значения механической прочности на разрыв – P_p (по 10 полос на точку). Установлено, что снижение СП и P_p вследствие термоокислительных процессов замедлено для ЭИБ с низким исходным значением $СП_0$, что можно объяснить известным снижением реакционной способности «коротких» цепей целлюлозы. Так для образца с $СП_{01} = 1208$ ед. $\tau_{P50\%}$ составило 215 ч, а для образца с $СП_{02} = 618$ ед. – (390-400) ч. Сопоставление времени достижения указанными образцами предельных значений по критериальным параметрам $СП_{кр}=200$ ед. и $P_{p50\%}$

показало их значительное расхождение. Также не совпали расчетные (на основе представленного в литературе выражения, отражающего корреляцию СП и P_p) и экспериментальные значения характеристик. В частности, для образца №1 на момент достижения СП критического значения $P_{p \text{ эксп}}$ оказалось на 87 % больше, чем $P_{p \text{ расч.}}$. По-видимому, характер отклика материала на многофакторное воздействие более сложный, чем представлялось, что подтверждается современными сведениями о морфологии целлюлозы и диэлектриков на её основе. Визуальный анализ состояния исследованных образцов ЭИБ, проведенный нами на основе SEM-кадров высокой степени разрешения, позволил уточнить особенности развития разрушения целлюлозной основы бумаги, что во многом объясняет полученные нами результаты, которые показали, что: значение СП₀ ЭИЦ, равное 1200 ед., не является оптимальным; величина СП = 250 ед. необоснованно считается критической; критериальные параметры предельного состояния ЭИБ нуждаются в корректировке, а механические характеристики бумаги и по достижении «критического» значения по СП могут обеспечивать работоспособность ЭИБ. Представленные результаты указывают на возможность продления срока эксплуатации ряда силовых трансформаторов (при условии достоверной оценки состояния их БПИ), что особенно актуально в связи со значительным износом парка отечественных СТ. По экономическим причинам полная замена силового оборудования, перешагнувшего нормативный срок службы, не представляется возможной. Поэтому на решение об остановке трансформатора должно указывать, в частности, фактическое состояние его изоляции, с целью получения более полной информации о котором нами впервые (применительно к целлюлозной электроизоляционной бумаге) был использован новый неразрушающий спектрально-корреляционный метод диагностики (разработанный в СПбПУ). Для сравнительной оценки степени разрушения образцов ЭИБ марки К 140 в процессе ускоренного термостарения определялись значения функции взаимной корреляции распределений интенсивности рассеянного излучения, как функции разности длин волн (рис. 7), в узком диапазоне изменения которой видна существенная разница между исследуемыми образцами.

Параллельно для них оценивались значения СП и механической прочности на разрыв, которые

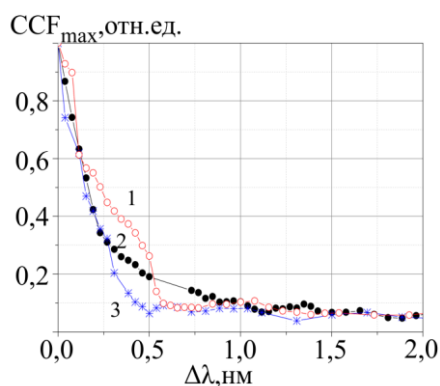


Рис. 7. Максимальные значения функции взаимной корреляции распределений интенсивности рассеянного излучения, как функция разности длин волн для бумаги К-140: 1 – до термостарения; после термостарения 2 – 170 ч, 3 – 530 ч

составили: в исходном состоянии (1) – СП₀ = 618 ед., P_p = 257 Н; после термостарения (при температуре 140° С и свободном доступе воздуха) в течение 170 ч – СП = 440 ед., P_p = 175 Н; в течение 530 ч - СП = 240 ед., P_p = 84 Н. Представленные сведения были дополнены SEM-кадрами (по 10 изображений на образец) фрагментов исследуемой бумаги. Совпадение результатов оценки степени разрушения материала, полученной разными способами, позволяет рекомендовать указанный оптический метод в качестве нового инструмента диагностики ЭИБ (в перспективе – непосредственно в составе БПИ СТ).

Во втором разделе четвертой главы изучалась эффективность совершенствования ЭИБ путем модификации её основы бактериальной целлюлозой (БЦ) с целью повышения электрофизических свойств, механической прочности и нагревостойкости диэлектрического материала. Сопоставление значений $E_{пр}$ (рис. 8-а), а также динамики изменения предела механической прочности на разрыв (рис. 8-б) 3-х партий опытных образцов ЭИБ (изготовленных в лабораторных условиях СПбГЛТУ), показало явное превосходство бумаги из 100 % БЦ - №3 и высушенной на воздухе nano-гель-пленки БЦ (НГП БЦ - №4) над ЭИБ традиционного исполнения из ЭИЦ сосны (№ 1) и композитом (№ 2), обусловленное уникальным строением и высокой степенью упорядоченности биополимера.

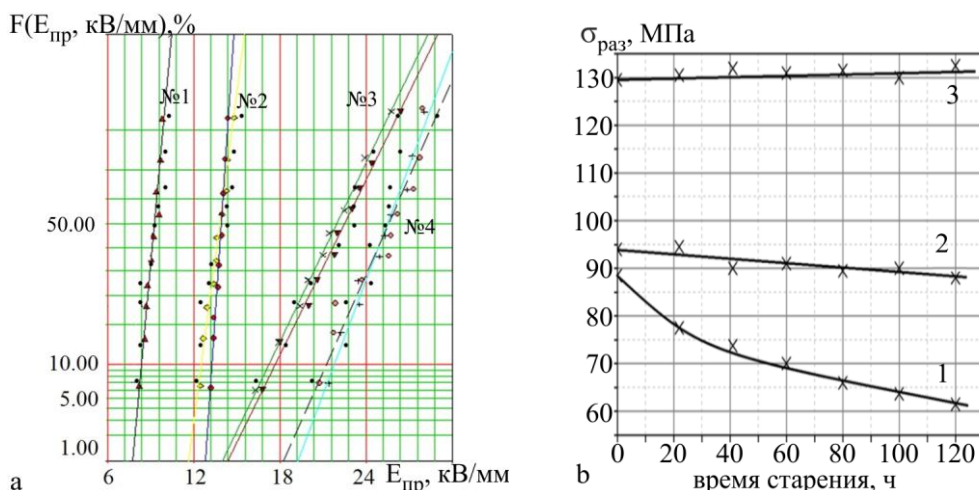


Рис. 8. Функции Нормального распределения кратковременной электрической прочности в исходном состоянии (а) и зависимости предела механической прочности на разрыв (б) образцов ЭИБ состава: №1 – 100% ЭИЦ; №2 – 90% ЭИЦ + 10% БЦ; №3 – 100% БЦ; №4 – НГП БЦ

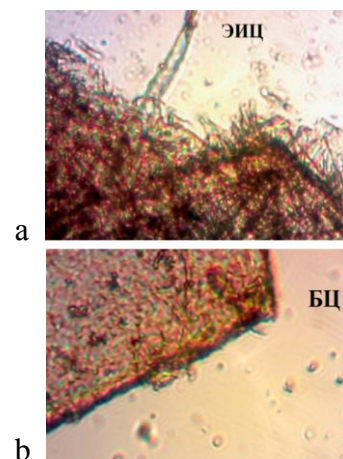


Рис. 9. Микрофотографии (400х) фрагментов ЭИБ из 100 % ЭИЦ сосны (а) и 100 % БЦ (б) после 220 ч старения в масле ГК с Cu

Повышенная нагревостойкость ЭИБ из БЦ была подтверждена расчетом скоростей деструкции материала в процессе ускоренного термостарения на воздухе и в среде нефтяного масла, который выявил превосходство последней над бумагой из 100 % ЭИЦ сосны, как минимум, в 5 раз. Микрофотографии фрагментов ЭИБ (рис. 9) показали значительную степень разрушения полотна бумаги из ЭИЦ сосны (а) по сравнению с аналогом из БЦ (б). Однако, роспуск НГП БЦ (состоящей из тончайших волокон), необходимый для изготовления бумаги, существенно осложнен по сравнению с растительной целлюлозой. С целью выявления возможности решения указанной проблемы впервые

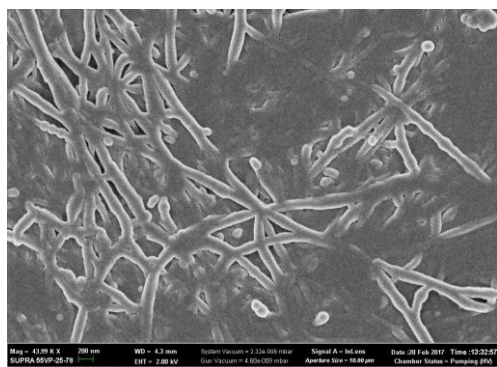


Рис. 10. Микрофотография (43.99 Kx) отливки БЦ

были испытаны образцы диэлектрика, полученные в ИВС РАН путем дезинтеграции НГП БЦ при помощи промышленного блендера с последующим отливом суспензии биополимера (разработка А.К. Хрипунова). На рис.10 представлен SEM-кадр, иллюстрирующий морфологические особенности полученной отливки диэлектрика. Сравнительная оценка $E_{пр}$ опытного материала (табл. 2) показала его превосходство над прочими образцами ЭИБ

даже при значительном разбросе результатов (из-за неотработанной технологии отлива).

Таблица 2.

Значения $E_{пр}$ целлюлозных диэлектриков

Состав ЭИБ	100% ЭИЦ	90% ЭИЦ+10% БЦ	100 % БЦ	НГП БЦ	Отливка 100 % БЦ	
$h_{ср}$, мм	0,140	0,140	0,139	0,142	0,137	0,120
$E_{пр ср}$, кВ/мм	9,1	14,2	22,5	25,2	58,0	69,4
$K_{вар}$, %	6,4	6,2	14,1	11,8	22,3	23,0

После выдержки фрагментов целлюлозных материалов из 100 % ЭИЦ (бумага марки К 140 – прототип) и отливки из 100 % БЦ в нефтяном масле марки ГК в течение 48 часов при комнатной температуре $E_{пр}$ первого образца увеличилось в среднем в 4 раза (с 8,7 до 42) кВ/мм, а второго (вследствие тончайшей пористости) - в 2 раза (с 62 до 112) кВ/мм. Таким образом, полученные сведения позволяют рекомендовать продолжить работу данного направления, так как она создает перспективы промышленного получения ЭИБ нового поколения на основе НГБ БЦ.

Третий раздел главы содержит результаты экспериментальных исследований композиционной бумаги (изготовленной в СПбГЛТУ), полотно которой было модифицировано введением (предварительно обработанного до выявления волокнистой основы) структурообразующего хитин-

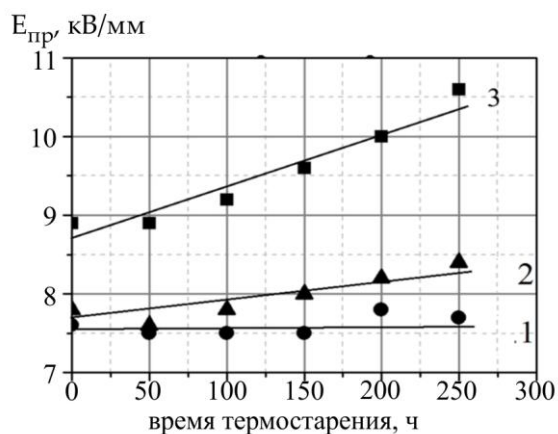


Рис. 11. Зависимости $E_{пр} = f(\tau)$ образцов ЭИБ состава: №1 – К 140 (100% ЭИЦ); №2 – отливка (100 % ЭИЦ); №3 – отливка 95 % ЭИЦ +5% ХГК

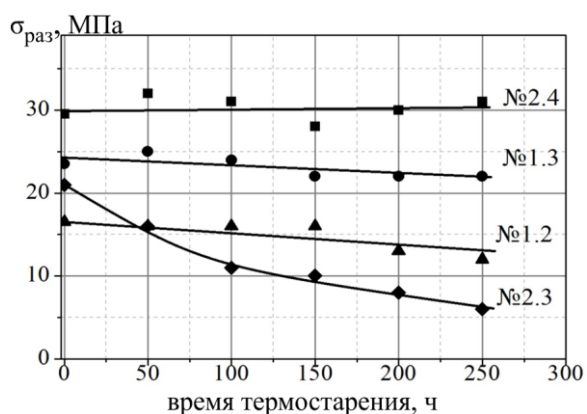


Рис. 12. Зависимости предела механической прочности образцов ЭИБ состава: №1.2 – 95% ЭИЦ +5% ХГК (I партия); №1.3 – 90% ЭИЦ+10%ХГК; №2.3 –отливка из 100% ЭИЦ; №2.4 – 95% ЭИЦ +5% ХГК (II партия);

глюканового комплекса (ХГК), полученного из отходов производства лимонной кислоты.

Сравнительные испытания двух партий модифицированной ЭИБ с различным процентным содержанием модификатора (некоторые результаты которых представлены на рис. 11 и 12) выявили легирующее воздействие ХГК на основу бумаги из традиционной растительной целлюлозы, что привело к постепенному (аномальному) росту $E_{пр}$ композита (рис. 11) и некоторой стабилизации его механической прочности на разрыв (рис. 12) в процессе ускоренного термостарения. Эффективность модификации можно объяснить уменьшением размеров воздушных включений за счет встраивания модификатора в пустоты целлюлозной основы и образования дополнительных водородных связей между ХГК и целлюлозой. Указанное предположение подтверждено SEM-кадрами, на которых отчетливо прослеживается размещение волокон ХГК в целлюлозной основе электроизоляционной бумаги. Оценка сорбционной активности модифицированной ЭИБ, основанная на изучении динамики коэффициента относительного светопропускания трансформаторных жидкостей в процессе термостарения в контакте с

исследуемой бумагой и медным катализатором, обнаружила, что по способности к очистке нефтяного масла композит не уступает целлюлозному диэлектрику традиционного исполнения, сохраняя повышенную устойчивость полотна даже в среде MIDEL 7131 (подтвержденную видеорядом микрофотографий) в отличие от ЭИБ из 100 % ЭИЦ.

Таким образом, применение ХГК способствует совершенствованию основных свойств ЭИБ и более полному использованию природных ресурсов, частично решая экологическую проблему переработки биомассы из многотоннажных отходов производства лимонной кислоты (хранение которой приводит к существенному загрязнению окружающей среды, в частности, канцерогенами). По данной разработке совместно с СПбГЛТУ подана заявка на патент РФ «Способ получения электроизоляционной бумаги» (регистрационный № 2016149477, приоритет от 15.12.16.).

Основные выводы и результаты работы

1. Впервые предложен способ получения электроизоляционной бумаги, обеспечивающий повышение работоспособности компонентов БПИ за счет модификации целлюлозной основы структурообразующим, сорбционно-активным хитин-глюкановым комплексом (ХГК) из многотоннажных отходов производства лимонной кислоты.
2. Впервые показано, что значительного повышения электрофизических свойств и нагревостойкости ЭИБ можно достичь за счет формирования основы материала из бактериальной целлюлозы.
3. Впервые подтверждена эффективность разработанного в ИВС РАН способа дезинтегрирования НПП БЦ, что открывает перспективу получения ЭИБ из биополимера в промышленных масштабах.
4. Экспериментально доказана необходимость корректировки принятых критериальных характеристик предельного состояния целлюлозных диэлектриков.
5. Изучена и обоснована работоспособность ЭИБ с низкой степенью полимеризации, что дает основание для увеличения срока эксплуатации СТ при условии мониторинга БПИ.
6. Получены экспериментальные сведения, подтверждающие необходимость оценки совместимости компонентов бумажно-пропитанной изоляции в условиях контакта с материалами конструктивных элементов электротехнических устройств с целью получения достоверной информации об их работоспособности (в том числе – при разработке перспективных диэлектрических материалов).
7. Расширены представления об эффективности оптических (неразрушающих) методах диагностики компонентов БПИ (включая экспериментальное подтверждение взаимосвязи результатов впервые примененного к оценке степени деградации целлюлозной бумаги нового спектрально-корреляционного метода с рядом традиционно контролируемых характеристик ЭИБ), повышающих достоверность и информативность сведений о текущем состоянии бумаги.
8. Выработаны рекомендации, касающиеся перспектив использования жидких диэлектриков MIDEL в отечественном трансформаторостроении с учетом их совместимости с ЭИБ и нефтяными маслами, для оценки которой разработано и впервые применено оптическое устройство, расширяющее пределы измерения K_{oc} .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Резник, А.С. Влияние степени полимеризации макромолекулы целлюлозы на работоспособность бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, Д.В.Кизеветтер, Д.О. Ташланов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2017, № 2 , С. 53-61 (рекомендовано ВАК РФ).
2. Резник, А.С. Метод измерения спектральных характеристик технических масел / Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник // Оптический журнал, 2016, Т. 83, №5, С. 36-42 (рекомендовано ВАК РФ, индексируется в базах Scopus и Web of Science).
3. Резник, А.С. О повышении ресурса бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов / Н.М. Журавлева, Д.В. Кизеветтер, Е.Г. Смирнова, А.С. Резник // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2015, № 4 (231), С. 115-124 (рекомендовано ВАК РФ).
4. Резник, А.С. Устройство для оперативного контроля качества технического масла / Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник // Пат. РФ №141304, G01N 21/25, опубл. в 27.05.2014 г. БИ №15, заявка 31.01.2014 г. № 2014103384.

Публикации, индексируемые в базах Scopus и Web of Science

5. Резник, А.С. The impact of the degree of polymerization of the cellulose molecules on the electrical and mechanical properties of insulating paper / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, Д.В.Кизеветтер, Д.О. Ташланов // Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus), 1– 3 February 2017 Saint-Petersburg, p.1220-1223.
6. Резник, А.С. The Study of Thermal Aging Components Paper-Impregnated Insulation of Power Transformers / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, А.В. Тукачева, Д.В. Кизеветтер, Е.Г. Смирнова // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2– 3 February 2016 Saint-Petersburg p.782-786.
7. Резник, А.С. On the increasing of the sorption capacity and temperature resistance of cellulosic insulation dielectrics / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, А.В. Тукачева, Д.В.Кизеветтер, Е.Г. Смирнова // Proceedings of the 11th International Conference “ELECTRO 2016”, 16 – 18 may 2016, Slovak Republic, p.649-653.
8. Резник, А.С. Study of thermal aging of mixture of transformer insulating liquids / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, Д.В.Кизеветтер // Proceedings of the 11th International Conference «ELEKTRO 2016», 16 – 18 may 2016, Slovak Republic, p.645-648.
9. Резник, А.С. On Possibility of Power Transformer Operational Reliability Increase / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, Д.В.Кизеветтер, Е.Г. Смирнова, А.К. Хрипунов, А.В. Тукачева // Proceedings 10th Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, Tallinn, 2016, p. 193-198.
10. Резник, А.С. About the possibilities of increasing the reliability of paper-impregnated insulation of power transformers / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, Д.В.Кизеветтер, Е.Г. Смирнова, А.В. Тукачева // Proceedings of 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering (RTUCON) , Riga , 2016, 4 p.

Публикации в других изданиях

11. Резник, А.С. Работоспособность смесей минеральных и синтетических жидких диэлектриков для силовых трансформаторов / А.С. Резник // Материалы VII конференции молодых специалистов инженерно-технических подразделений ПАО «Силовые машины», СПб, 2016, с.36-37.
12. Резник, А.С. Органоминеральные композиты на основе целлюлозы gluconacetobacter xylinus для энергетики / Н.М. Журавлева, А.С. Резник, А.К. Хрипунов [и др.] // Материалы конференции «Федоровская сессия 2016», СПб, Горный университет, 2016, с 159-160.
13. Резник, А.С. Повышение срока службы бумажно-пропитанной изоляции / Н.М. Журавлева, Д.В. Кизеветтер, Е.Г. Смирнова, А.С. Резник, Н.С. Панин // Международный научно-исследовательский журнал, 2015, № 9 (140), С. 22-24 (индексируется в базе Agris)
14. Резник, А.С. Application of the spectral-correlation method for diagnostics of cellulose paper / А.С. Резник, Д. Кизеветтер, В. Малюгин, А. Юдин, Н. Журавлева // Book of abstracts, 4th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia, April 3 – 6, 2017, p. 204-205.