

DOI 10.5862/JEST.231.12

УДК 621.3.048.1

Н.М. Журавлева, Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник, Е.Г. Смирнова

О ПОВЫШЕНИИ РЕСУРСА БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

N.M. Zhuravleva, D.V. Kieseewetter, A.S. Reznik, E.G. Smirnova

ON INCREASING THE OPERATIONAL LIFE OF PAPER-IMPREGNATED INSULATION OF POWER TRANSFORMERS

Дано обоснование и экспериментально подтверждена необходимость усовершенствования методов текущего контроля состояния базового вида высоковольтной изоляции силовых трансформаторов, а также исследована возможность повышения электрофизических характеристик и замедления процессов деструкции компонентов бумажно-пропитанной композиции путем модификации диэлектрической бумаги бактериальной целлюлозой с целью увеличения срока службы этой изоляции. Показано, что структурирование растительной основы целлюлозного диэлектрика биополимером позволяет повысить электрическую и механическую прочность бумаги, способствует повышению нагревостойкости компонентов изоляции. Это подтверждено результатами оценки параметров волокна и микрофотографиями компонентов изоляции до и после старения.

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ; БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ; ШЛАМ; БАКТЕРИАЛЬНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА; МОДИФИКАЦИЯ; ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТЬ КОМПОНЕНТОВ.

The substantially and experimentally confirmed the need to improve methods of monitoring the state of the base type of high-voltage insulation of power transformers (PT), and explored the possibility of increasing the electrical characteristics and slowing the destruction of the components of paper-impregnated composition by modifying the dielectric paper by bacterial cellulose in order to increase the life of the PT insulation. It is shown that structuring of plant-base of cellulose dielectric by biopolymer can improve the electrical and mechanical strength of the paper, enhances heat resistance of insulations components. These results are confirmed by evaluation of fibers parameters and insulation components microphotographs before and after aging.

POWER TRANSFORMERS; PAPER-OIL INSULATION; SLUDGE; BACTERIAL CELLULOSE; MODIFICATION; ELECTRICAL PROPERTIES; THERMALLY STABLE COMPONENTS.

Введение

Проблема бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей тесным образом связана со стабильной работой силовых трансформаторов (СТ), отказ которых чреват не только опасными и крайне нежелательными отключениями, но зачастую сопровождается техногенными инцидентами и пожарами. Практикой многократно подтвержден тот факт, что срок

службы каждого СТ определяется не столько временем, сколько режимом его эксплуатации, который в необходимой степени (для получения достоверного прогноза работоспособности энергетического устройства) непредсказуем [1]. В то же время анализ результатов обсуждения указанного вопроса специалистами различного уровня, включая заключения Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» Международного со-

вета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) [1–3], позволяет утверждать, что основная причина отказов СТ – это старение бумажно-пропитанной изоляции (БПИ), которая в силовом трансформаторостроении остается базовой и на сегодняшний день не имеет конкурентоспособных аналогов. Следовательно, совершенствование электрофизических характеристик компонентов диэлектрической системы и поиск путей увеличения ресурса БПИ представляет собой практически полезную, актуальную задачу и в целом является одним из необходимых элементов повышения надежности функционирования энергосистем.

Цель работы – на основе экспериментальных исследований новых видов модифицированных целлюлозных диэлектриков показать возможность повышения работоспособности и ресурса компонентов бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов.

Обоснование выбора мер, направленных на повышение работоспособности бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов

В процессе эксплуатации СТ электроизоляционная бумага (ЭИБ) и трансформаторное масло (ТМ) подвергаются многофакторному воздействию, инициирующему деструктивные процессы (в частности, термоокислительные), необратимые последствия которых проявляются, в первую очередь, в виде образования продуктов старения жидкости, активизирующих дальнейшее разрушение компонентов изоляции. Как следствие, происходит снижение диэлектрических характеристик масла [4, 5]. В частности, имеет место рост тангенса угла диэлектрических потерь жидкого диэлектрика (то есть наблюдается негативное изменение одного из основных контролируемых параметров при диагностике состояния БПИ). Постепенно из фрагментов целлюлозных волокон, продуктов старения, механических примесей и ряда иных компонентов в ТМ формируется шлам, осаждение которого на конструктивных элементах и изоляции трансформатора ведет к опасному росту электропроводности последней [5]. Необходимо своевременная замена масла, которая используется в качестве превентивной меры,

повышающей работоспособность БПИ. Периодический контроль характеристик изоляции СТ включает в себя оценку преимущественно электрофизических и химических характеристик жидкости [6, 7], в том числе обязательное определение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), значение которого не должно превышать критериальных пределов. Однако по существующим нормативам диагностика проводится достаточно редко [8]. Поэтому вполне вероятна ситуация, когда очередной отбор трансформаторного масла будет произведен после коагуляции и выпадения в осадок мелкодисперсных частиц шлама, что может негативно сказаться на достоверности результатов исследования контрольных проб жидкости (в частности, может привести к получению заниженных значений ее $\text{tg}\delta$) [9]. Данный тезис подтверждают и результаты наших испытаний. Были определены (согласно ГОСТ 6581–75 при помощи автоматизированной установки «ТАНГЕНС–3М» при температуре 90 °С и частоте 50 Гц) значения $\text{tg}\delta$ трех образцов трансформаторного масла марки ГК. Эти величины составили: 0,15 % для ТМ, предназначенного для заливки в СТ; 100 % для ТМ, слитого из действующего трансформатора, и 5 % для предыдущей пробы ТМ после оттаивания шлама, которое наблюдалось визуально. Поэтому для эффективного выявления критического состояния жидкого диэлектрика необходим непрерывный мониторинг шламообразования при помощи волоконно-оптической техники [9–11]. Оптические методы контроля могут быть полезны и для расширения представлений о степени очистки ТМ в ходе его регенерации с целью последующего (повторного) использования [12].

Указанные меры могут способствовать предотвращению эксцессов, обусловленных некондиционным состоянием масла. Однако ресурс бумажно-пропитанной изоляции СТ вполне закономерно определяется состоянием бумаги, замена которой невозможна. В процессе эксплуатации диэлектрические характеристики ЦБ практически не изменяются. В то же время механическая прочность материала, отличающегося низкой нагревостойкостью, падает по мере снижения средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы (вследствие термоокислительной деструкции природного полимера) [13, 14]. Иными словами, происходит постепен-

ное, относительно медленное старение и физическое разрушение ЭИБ, которое усиливается механическими нагрузками при движении проводников в режиме короткого замыкания СТ. Указанные воздействия особенно опасны при наличии в твердой изоляции мест локального перегрева, так как рост температуры существенно увеличивает скорость деструкции целлюлозного материала.

Вполне очевидно, что для решения задачи увеличения срока службы БПИ силовых трансформаторов необходим как непрерывный мониторинг состояния жидкого диэлектрика в процессе эксплуатации, обеспечивающий оптимизацию сроков замены масла, так и поиск эффективных мер, направленных на замедление термостарения компонентов изоляции. Последнее, на наш взгляд, может быть достигнуто использованием в БПИ электроизоляционных видов бумаги нового поколения, растительная основа которых модифицирована целлюлозой биологического происхождения [15]. Для расширения представлений о целесообразности и эффективности такого подхода были проведены исследования электрофизических характеристик и нагревостойкости компонентов опытной бумажно-пропитанной композиции на основе модифицированных целлюлозных диэлектриков, пропитанных трансформаторным маслом.

Объект и методы исследования

Оценка возможности увеличения ресурса компонентов БПИ проводилась на основе электрических, механических, оптических, а также микроскопических методов исследования опытных образцов электроизоляционной бумаги в исходном состоянии и в процессе ускоренного термостарения (при температуре 140 °С в контакте с медью – катализатором процесса деструкции) как при свободном доступе воздуха, так и в среде трансформаторного масла марки ГК. Определялись изменения параметров целлюлозного волокна, а также исследовались зависимости кратковременной электрической прочности ЭИБ и предела механической прочности на разрыв от времени термостарения. Сорбционная способность и морфологические изменения целлюлозного материала оценивались оптическими методами с использованием цифровой камеры CELESTRON (Digital microscope image), в ре-

зультате чего был получен ряд микроснимков, позволивших дополнить полученные результаты и их анализ фотофактами.

В качестве объекта исследования выбраны образцы опытной электроизоляционной бумаги, полотно которой было сформировано двумя видами целлюлозы: традиционной электроизоляционной из древесины сосны сульфатной варки (в дальнейшем РЦ – растительная целлюлоза) и бактериальной (БЦ), синтезируемой в виде нано-гель-пленки бактериями *Glucopacetobacter xulinus* на субстратах, содержащих источники углерода, азота, витаминов и воду. Иными словами, целлюлозная основа ЭИБ состояла из волокон, не просто характеризующихся сродством, а являющихся химически идентичными компонентами различного природного происхождения. Однако БЦ отличается от РЦ высокой структурной упорядоченностью (что обеспечивает тончайшую пористость), химической чистотой, более высокой степенью кристалличности и механической прочностью.

Испытывались образцы электроизоляционной бумаги (изготовленные в лаборатории Лесотехнического университета) следующего состава:

№ 1 – 100 % БЦ;

№ 2 – 100 % РЦ (промышленное производство, прототип);

№ 3 – 90 % РЦ + 10 % БЦ.

Помимо этого, рассматривались однослойные лабораторные отливки целлюлозного диэлектрика (отличающиеся от ЭИБ повышенной рыхлостью полотна), модифицированные микроразветвленной целлюлозой (МКЦ) – продуктом химической деструкции Ц (в нашем случае – РЦ и БЦ), который характеризуется высоким содержанием упорядоченной части Ц с кристаллографической ориентацией макромолекул, а именно:

№ 4 – 100 % РЦ (прототип);

№ 5 – 97 % РЦ + 3 % МКЦ из РЦ;

№ 6 – 97 % РЦ + 3 % МКЦ из БЦ.

Сравнительная оценка кратковременной электрической прочности ЭИБ

На рис. 1 представлены функции нормального распределения кратковременной электрической прочности ($E_{пр}$) исследуемых образцов бумаги в исходном состоянии, полученные путем

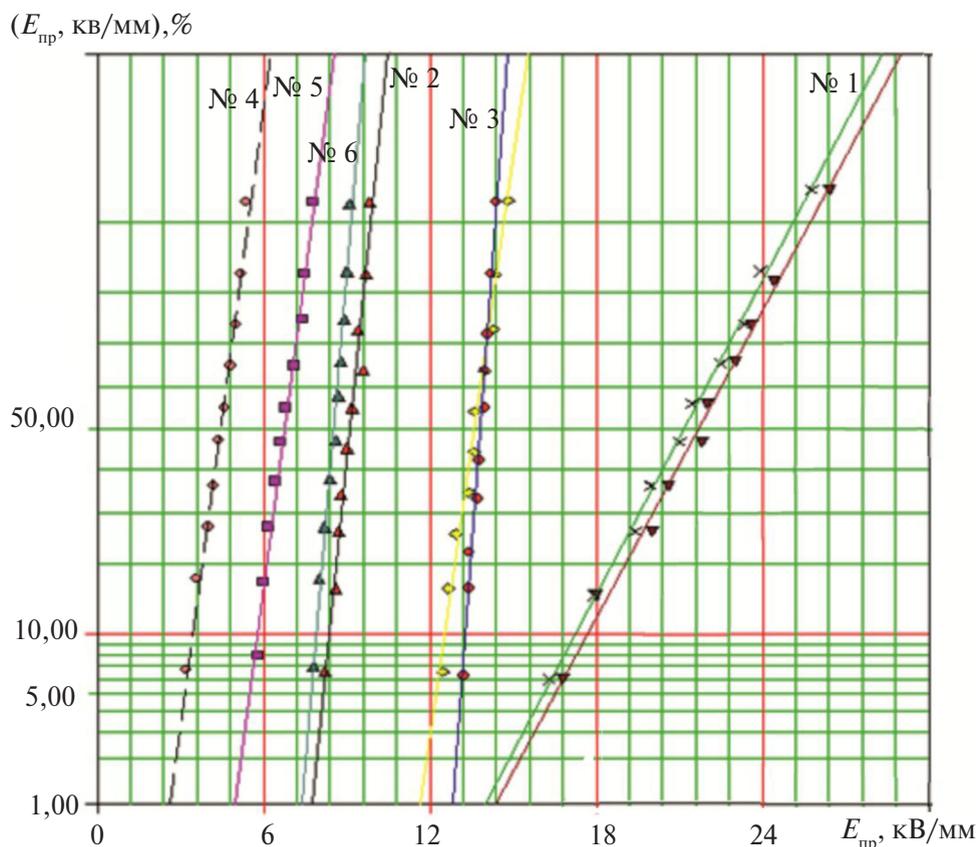


Рис. 1. Функции нормального распределения кратковременной электрической прочности опытных видов целлюлозных диэлектриков в исходном состоянии

испытаний переменным напряжением промышленной частоты в системе электродов «шар (Ø 6 мм) – плоскость (Ø 20 мм)».

Видно, что наиболее высокой электрической прочностью выгодно отличается бумага из БЦ (№ 1 – $E_{пр\text{ ср}} = 29,7$ кВ/мм), которая существенно превосходит промышленный образец ЭИБ традиционного исполнения (№ 2 – $E_{пр\text{ ср}} = 9,1$ кВ/мм). Данный эффект, по-видимому, связан с высокой плотностью упаковки высокоориентированных макромолекул и тончайших волокон БЦ в полотно материала.

Композит из РЦ и БЦ (№3 – $E_{пр\text{ ср}} = 13,8$ кВ/мм) также показал превосходство по электрической прочности над прототипом (№2), что, по нашему мнению, обусловлено структурирующей функцией биополимера. Указанная особенность имела место и при введении в целлюлозную отливку из РЦ микрокристаллической целлюлозы из РЦ (№5 – $E_{пр\text{ ср}} = 6,7$ кВ/мм), а особенно – из БЦ (№6 – $E_{пр\text{ ср}} = 8,5$ кВ/мм), что способствова-

ло росту электрической прочности опытного материала по сравнению с немодифицированным прототипом (№4 – $E_{пр\text{ ср}} = 4,4$ кВ/мм). МКЦ вводилось в минимальном количестве (всего 3 % от массы сухого волокна растительной Ц), а значит, эффект от использования данного вида модификации гипотетически может быть существенно выше. Необходимо отметить, что при испытании ЭИБ из 100 % БЦ (образец №1) наблюдался существенный разброс значений характеристики, что связано с известной сложностью роспуска волокон биологического происхождения, которая может быть преодолена при обработке технологии получения материала.

Специалистам хорошо известна положительная особенность целлюлозной бумаги традиционного исполнения: ее электрическая прочность остается неизменной при тепловом старении (так как пробой развивается преимущественно по воздушным включениям [13]) и лишь незначительно снижается [5] при многофакторном

воздействии в процессе эксплуатации СТ (что можно объяснить старением пропитывающего состава). После ускоренного термостарения на воздухе (в течение 120 часов при температуре 140 °С) значения $E_{пр}$ рассматриваемых опытных образцов диэлектрика также практически не изменились.

Таким образом, если изготовить целлюлозный диэлектрик непосредственно из высушенной на воздухе нано-гель-пленки биополимера (наши испытания выявили ее более высокие показатели электрической прочности по сравнению с представленной в данной публикации бумагой из волокон бактериальной целлюлозы), что, однако, в промышленных масштабах на сегодняшний день невозможно ввиду отсутствия необходимых условий, технологий и оборудования, то использование БЦ для получения бумаги вполне реально. При этом полученные результаты позволяют прогнозировать возможность

повышения кратковременной электрической прочности ЭИБ по крайней мере в 1,3 раза (композит из РЦ и БЦ) и в 3 раза (ЭИБ из БЦ). Перспективным представляется и развитие исследований по модификации целлюлозной бумаги микрокристаллической целлюлозой из РЦ, а особенно – из БЦ.

Оценка нагревостойкости ЭИБ (на основе изучения предела механической прочности на разрыв)

Результаты изучения предела механической прочности на разрыв (σ_p) образцов №1–№6 в исходном состоянии, а также в процессе ускоренного термостарения (при температуре 140 °С в течение 120 часов при свободном доступе воздуха) представлены на рис. 2.

Анализируя характер изменения σ_p , можно заключить, что использование БЦ способствует повышению устойчивости целлюлозного мате-

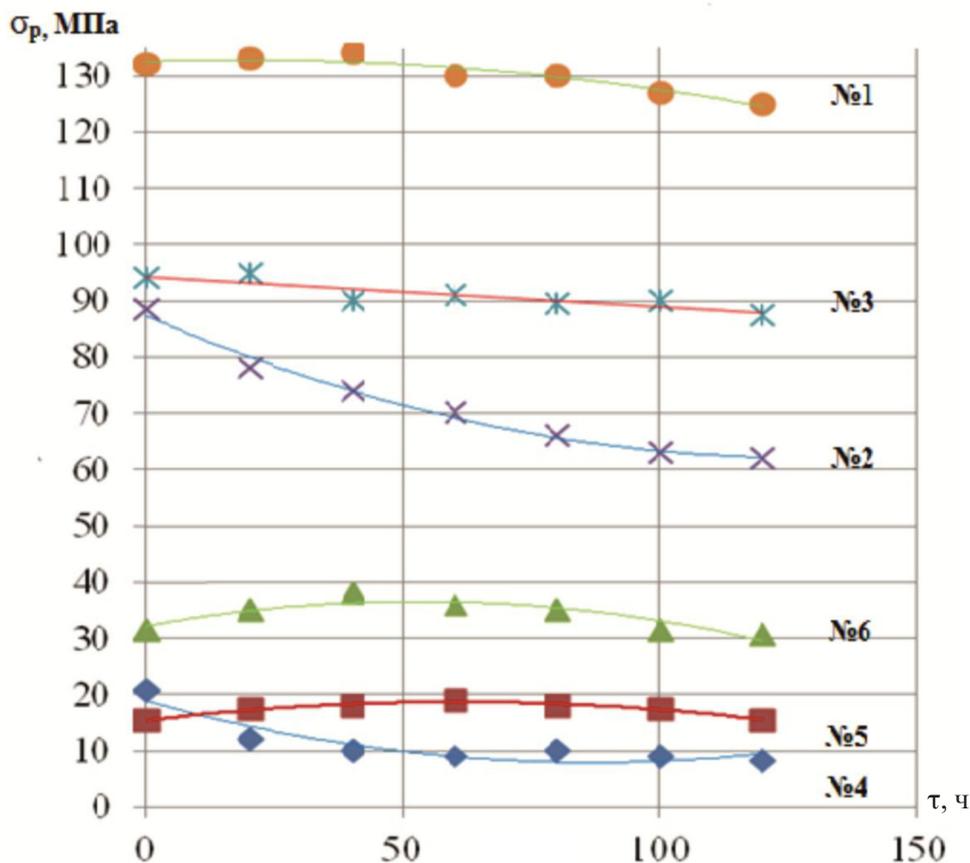


Рис. 2. Зависимости предела механической прочности на разрыв исследуемых целлюлозных образцов от времени термостарения

риала (как бумаги, так и отливок) к длительному термовоздействию. Очевидно, что технология введения биоволокон и в данном случае существенно влияет на результат. Так, образец электроизоляционной бумаги №1 (из 100 % БЦ) по величине σ_p превосходит все исследованные материалы и превышает аналогичный показатель промышленного прототипа (№2) в 1,5 раза. Для указанного опытного образца, а также для композита из РЦ и БЦ (№3) была выявлена повышенная термостабильность характеристики, которая зафиксирована и для отливки, модифицированной МКЦ из БЦ (№6).

Действительно, на момент окончания испытаний предел механической прочности на разрыв образцов бумаги №1 и №3 снизился соответственно на 5 и 8 %, тогда как прототип (№2) потерял 30 % прочности. Что касается отливки №6, то значение ее σ_p практически не изменилось, в то время как аналогичный показатель отливки из 100 % РЦ (№4) упал на 50 %. Незначительный рост механической прочности образца ЭИБ №1, а также отливок №5 и №6 в начале процесса старения, что иллюстрируют представленные зависимости σ_p от времени испытаний, можно связать с постепенным удалением воды и образованием дополнительных водородных связей.

Анализ геометрии целлюлозного волокна

Интересен тот факт, что анализ морфологических особенностей образцов №1 – №3 до и после термостарения, проведенный при помощи Fiber Tester, выявил увеличение средней ширины волокон после термовоздействия в ЭИБ из 100 % биополимера (№1) и в композите из РЦ и БЦ (№3), тогда как для бумаги традиционного исполнения (№2 – из 100 % РЦ) наблюдается снижение указанного геометрического параметра. По-видимому, вследствие известной сложности разделения волокон биополимера на отдельные элементы удается оценивать параметры не единичных волокон БЦ, а их укрупненных образований (пучков). Однако и в случае справедливости указанного предположения полученный результат (до старения образования БЦ по ширине превосходили волокна РЦ в среднем на 15 %, а после термовоздействия это превосходство увеличилось до 200 %) противоречит традиционным представлениям о морфологиче-

ских изменениях целлюлозного волокна под действием температуры. Результаты анализа изменения параметров волокна композита из РЦ и БЦ (№3) также продемонстрировали рост их ширины после старения, но в меньших пределах (в среднем на 10 %). Гипотетически объяснением данного явления, по нашему мнению, может служить высокоупорядоченная структура БЦ, в которой, как отмечалось, фибриллы более ориентированы, чем в РЦ, и вследствие этого имеют прочные водородные связи. В процессе термоокислительной деструкции при разрывах макромолекул и межмолекулярных связей происходит образование активных центров, что может привести к появлению дополнительных сшивок между соседними фибриллами: как следствие, ширина волокна возрастает, а падение прочности бумаги замедляется.

В то же время хорошо известное суждение, что повышенная длина целлюлозного волокна ведет к увеличению механической прочности и нагревостойкости ЭИБ, применительно к ЭИБ из БЦ не подтвердилось: средняя длина волокна БЦ в образце №1 оказалась в исходном состоянии на 35 % ниже, чем волокна растительной целлюлозы в образце №2. Аналогичные исследования композита из РЦ и БЦ (№3) также продемонстрировали морфологические особенности материала по сравнению с монобумагами (№1 и №2), а именно: длина его волокна оказалась в среднем на 14 % больше (по сравнению с образцом №2 из 100 % РЦ), а ее снижение после термостарения составило всего 9 %, тогда как для образцов из 100 % РЦ (№2) и 100 % БЦ (№1) этот показатель находился в пределах 25 %. Видимо, БЦ в композите не только структурирует растительную основу бумаги в исходном состоянии, но и замедляет ее разрушение при термоокислительных процессах (возможно, благодаря образованию упомянутых сшивок).

Визуальный анализ сорбционной активности и состояния образцов ЭИБ

С целью проверки указанного предположения, а также для оценки сорбционной активности (то есть способности связывать продукты старения, ионогенные примеси, ионы металлов, воду и иные вещества) бумаги из биополимера было проведено ускоренное термостарение нефтяного трансформаторного масла марки ГК в

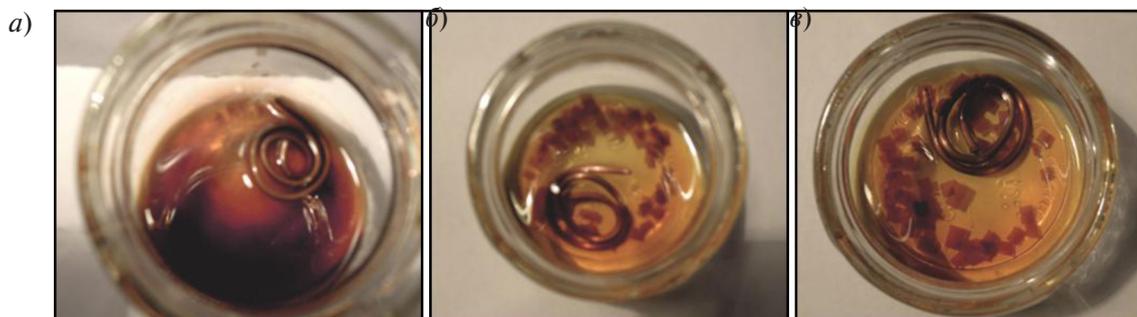


Рис. 3. Бюксы с трансформаторным маслом марки ГК после термостарения в течение 152 часов при температуре 140 °С в контакте с медью (а), а также с медью и образцами электроизоляционной бумаги состава 100 % БЦ (б); 100% РЦ (в)



Рис. 4. Микрофотографии ($\times 400$) проб трансформаторного масла марки ГК после термостарения при температуре 140 °С в течение 152 часов в контакте с медной спиралью (а), а также — с медной спиралью и ЭИБ из 100 % БЦ (б) и 100% РЦ (в)

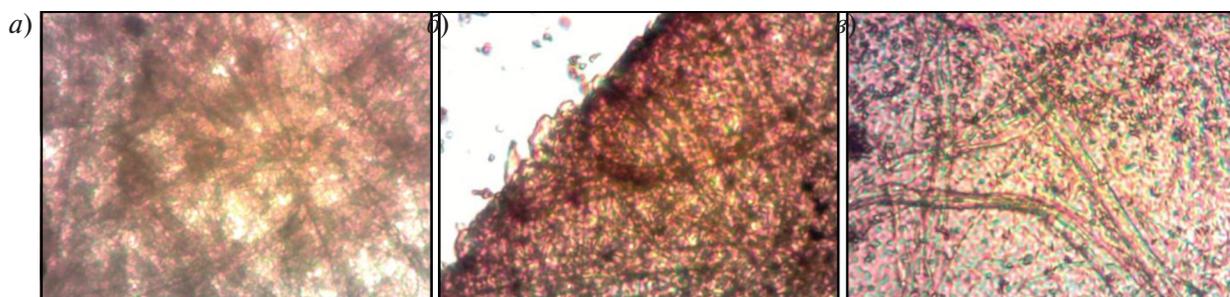


Рис. 5. Микрофотографии ($\times 400$) фрагментов электроизоляционной бумаги состава: 100% РЦ (а), 90% РЦ + 10% БЦ (б) и 100% БЦ (в), состаренных в среде трансформаторного масла марки ГК в контакте с медной спиралью при температуре 140 °С в течение 220 часов

контакте с медной спиралью — активным катализатором деструктивных процессов (рис. 3, а), а также (в аналогичных условиях) в контакте с медной спиралью и навесками исследуемых видов бумаги из 100 % БЦ (рис. 3, б) и 100 % РЦ (рис. 3, в). На приведенных фотоснимках отчетливо видно, что после 152 часов термостарения в случае отсутствия бумаги масло интенсивно разрушалось (бюкса а), вследствие чего на дне емкости скопился шлам. В случае термостарения ТМ в кон-

такте с медью и бумагой обоих видов шлам в бюксах б и в отсутствовал благодаря сорбционной очистке жидкого диэлектрика целлюлозными материалами в процессе старения. Микроскопические исследования указанных проб масла подтвердили отсутствие в них частиц шлама (рис. 4, б, в), в то время как масло из бюксы а содержало продукты разрушения жидкости (рис. 4, а).

Анализ состояния фрагментов бумаги после 220 часов термостарения при температуре 140 °С

в среде масла ГК (рис. 5) выявил, что степень разрушения ЭИБ, изготовленной из растительной целлюлозы по традиционной технологии (рис. 5, а) существенно выше (на полотне видны крупные пустоты) по сравнению с композитом из РЦ и БЦ (рис. 5, б) и опытной ЭИБ из бактериальной целлюлозы (рис. 5, в), что подтверждает структурирующую роль биополимера.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований:

показано, что в случае осаждения шлама тангенс угла диэлектрических потерь трансформаторного масла снижается, следствием чего может стать недостоверная оценка состояния жидкого диэлектрика при периодическом контроле степени старения БПИ силовых трансформаторов. Поэтому целесообразно дополнить традиционные методы испытаний оптическим мониторингом жидкости;

установлена возможность повышения $E_{пр}$ электроизоляционной бумаги в 1,3–3 раза (в зависимости от количественной оптимизации состава материала) из традиционно используемой целлюлозы сосны сульфатной варки при модификации этой основы бактериальной целлюлозой, что представляет практический интерес в виду стабильности характеристики в процессе

эксплуатации ЭИБ в составе бумажно-пропитанной изоляции СТ;

выявлены повышенные механическая прочность и термостабильность ЭИБ, модифицированной БЦ, в среде трансформаторного масла, обусловленные структурообразующей функцией биополимера, что подтверждено микрофотографиями фрагментов исследуемых материалов после термостарения;

микрофотографиями жидкого диэлектрика подтверждена сорбционная активность бумаги из бактериальной целлюлозы, что положительно сказывается на устойчивости пропитывающего жидкого диэлектрика к термовоздействию и способствует замедлению шламообразования в масле;

установлено, что степень влияния бактериальной целлюлозы на характеристики электроизоляционной бумаги и пропитывающей диэлектрической среды зависит от количества и способа введения биополимера; их оптимизация — предмет дальнейших исследований.

В целом можно заключить, что использование бактериальной целлюлозы в перспективе может способствовать получению целлюлозных диэлектриков нового поколения, которые представляют практический интерес в качестве компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов, отличающейся повышенной работоспособностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоханин А. Обзор докладов, представленных на 43 сессии международной конференции СИГРЭ по тематике исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. №3. С. 80–87.
2. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Электро. 2008. № 3. С. 12–17.
3. Бузаев В.В., Сапожников Ю.М., Дементьев Ю.А. [и др.]. О необходимости единой системы физико-химической диагностики изоляции оборудования трансформаторных подстанций // Энергетик. 2004. №11. С. 9–12.
4. Шувалов М.Ю. Исследование кабелей высокого напряжения, разработка и совершенствование методов электрического расчета и микродиагностики: Дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2000. 324 с.
5. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: учебное пособие. М.: Издательский центр Академия, 2003. 176 с.
6. Осотов В.Н. О методологии оценки состояния изоляции силовых трансформаторов с большим сроком службы // Электро. 2008. № 6. С. 27–29.
7. Saha T.K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers // IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation. 2003. Vol.10. №. 5. С. 903–917.
8. Савина А.Ю. Усовершенствование системы оптического мониторинга электроизоляционных масел: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013, 183 с.
9. Кизеветтер Д.В., Савина А.Ю., Журавлева Н.М., Воробьев А.В. К вопросу о диагностике состояния трансформаторного масла в процессе эксплуатации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2013. № 3 (178). С. 118–125.
10. Патент РФ №122187. Волоконно-оптический осветитель / Кизеветтер Д.В., Савина А.Ю., Бодров А.И., Стельмакова Н.О., Габдуллин П.Г., Левин

В.М., Баскаков Г.Г., Ильин Н.В., Банкул Н.В. Приоритет 15.03.2012.

11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. СПб.: Изд-во Декан, 2012. 304 с.

12. **Патент РФ №141304.** Устройство для оперативного контроля качества технического масла / Кизеветтер Д.В., Резник А.С. Приоритет 31.01.2014.

13. **Журавлева Н.М.** Стабилизация диэлектрических потерь в процессе термостарения бумажно-пропитанной изоляции: Дисс. ... канд. техн. наук.

ЛПИ. Ленинград, 1989. 187 с.

14. **Маслякова А.В.** Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика путем его модификации хитозаном: Дисс. ... канд. техн. наук. СПбГПУ. СПб., 2005. 204 с.

15. **Патент РФ №2415221.** Способ получения электроизоляционной бумаги / Журавлева Н.М., Сажин Б.И., Смирнова Е.Г., Хрипунов А.К., Ткаченко Т.В. Приоритет 30.04.2010.

REFERENCES

1. **Lokhanin A.** Obzor докладov, predstavlenykh na 43 sessii mezhdunarodnoy konferentsii SIGRE po tematike issledovatel'skogo komiteta A2 «Transformatory» [Review of reports submitted to the 43 session of the International Conference on the subject of CIGRE Study Committee A2 «Transformers»]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2010. №3. S. 80–87 (rus.)

2. **Vasin V.P., Dolin A.P.** Resurs izolyatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov [Resource of oil-filled power transformers insulation]. *Elektro*. 2008. № 3. S. 12–17. (rus.)

3. **Buzayev V.V., Sapozhnikov Yu.M., Dementyev Yu.A. [i dr.]** O neobkhodimosti yedinoi sistemy fiziko-khimicheskoy diagnostiki izolyatsii oborudovaniya transformatornykh podstantsiy [On the need for a unified system of physical and chemical diagnostic equipment for transformer substations insulation]. *Energetik*. 2004. №11. S. 9–12. (rus.)

4. **Shuvalov M.Yu.** Issledovaniye kabeley vysokogo napryazheniya, razrabotka i sovershenstvovaniye metodov elektricheskogo rascheta i mikrodiagnostiki [Research of high voltage cables, the development and improvement of methods for electric calculating and microdiagnostics]: Diss. ... d-ra tekhn. nauk. Moskva, 2000. 324 s. (rus.)

5. **Bystritskiy G.F., Kudrin B.I.** Vybor i ekspluatatsiya silovykh transformatorov [The selection and operation of power transformers]: Uchebnoye posobiye. M.: Izdatelskiy tsentr Akademiya, 2003. 176 s. (rus.)

6. **Osotov V.N.** O metodologii otsenki sostoyaniya izolyatsii silovykh transformatorov s bolshim srokom sluzhby [About the methodology for assessing the insulation condition of power transformers with a long service life]. *Elektro*. 2008. № 6. S. 27–29. (rus.)

7. **Saha T.K.** Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*. 2003. Vol.10, №. 5. C. 903–917.

8. **Savina A.Yu.** Usovershenstvovaniye sistemy opticheskogo monitoringa elektroizolyatsionnykh masel

[Improvement of the optical monitoring of insulating oils]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2013. 183 s.

9. **Kiesewetter D.V., Savina A.Yu., Zhuravleva N.M., Vorobyev A.V.** K voprosu o diagnostike sostoyaniya transformatornogo masla v protsesse ekspluatatsii [On the question of diagnostics of transformer oil in service]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta*. 2013. №3 (178). S. 118–125. (rus.)

10. **Patent RF №122187.** Volokonno-opticheskiy osvetitel [Fiber Optic Illuminator] / Kiesewetter D.V., Savina A.Yu., Bodrov A.I., Stelmakova N.O., Gabdullin P.G., Levin V.M., Baskakov G.G., Ilin N.V., Bankul N.V. Приоритет 15.03.2012. (rus.)

11. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley [Rules of technical operation of electrical consumers]. СПб.: Изд-во Декан, 2012. 304 с.

12. **Patent RF №141304.** Ustroystvo dlya operativnogo kontrolya kachestva tekhnicheskogo masla [A device for operational monitoring of technical oil] / Kiesewetter D.V., Reznik A.S. Приоритет 31.01.2014. (rus.)

13. **Zhuravleva N.M.** Stabilizatsiya dielektricheskikh poter v protsesse termostareniya bumazhno-propitannoy izolyatsii [Stabilization of the dielectric losses in the process of thermal aging paper-impregnated insulation]: Diss. ... kand. tekhn. nauk. LPI. Ленинград, 1989. 187 s. (rus.)

14. **Maslyakova A.V.** Povysheniye elektrofizicheskikh kharakteristik i ustoychivosti k termostareniyu tsellyulozasoderzhashchego dielektrika putem yego modifikatsii khitozanom [Increasing the electrical characteristics and resistance to heat aging of dielectric cellulose by modifying it with chitosan]: Diss. ... kand. tekhn. nauk. SPbGPU. СПб., 2005. 204 s. (rus)

15. **Patent RF №2415221.** Sposob polucheniya elektroizolyatsionnoy bumagi [A method for producing insulating paper] / Zhuravleva N.M., Sazhin B.I., Smirnova Ye.G., Khripunov A.K., Tkachenko T.V. Приоритет 30.04.2010. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЖУРАВЛЕВА Наталия Михайловна – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: Natalia_Zhurav@mail.ru

ZHURAVLEVA Nataliya M. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: Natalia_Zhurav@mail.ru

КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

KIESEWETTER Dmitrii V. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

РЕЗНИК Александр Сергеевич – инженер 2-й категории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: alexreznik85@gmail.com

REZNIK Aleksandr S. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: alexreznik85@gmail.com

СМИРНОВА Екатерина Григорьевна – доктор технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М.Кирова.

194021, Россия, Санкт-Петербург, Институтский пер., д.5..

E-mail: smirnovalta@gmail.com

SMIRNOVA Ekaterina G. – Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M Kirov.

5, Institutskiy per., St. Petersburg, Russia, 194021..

E-mail: smirnovalta@gmail.com