

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики/Высшая школа высоковольтной энергетики

Работа допущена к защите

Директор ВШВЭ

_____ В.О. Белько

«__» _____ 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

магистерская диссертация

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ БУМАГИ ИЗ БАМБУКА

по направлению подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника
направленность 13.04.02_12 – Физика и техника электротехнических
материалов и конструкций

Выполнил
студент гр. 3241302/91201

Е.А. Романенко

Руководитель
доцент, к.т.н.

А.С. Резник

Консультант
по нормоконтролю

А.П. Плотников

Санкт-Петербург

2021 г.

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА
ВЕЛИКОГО**
Институт энергетики / Высшая школа высоковольтной энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШВЭ

В.О. Белько

« » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту _____ Романенко Егору Александровичу, 3241302/91201
_____ фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: _____ Исследование механических свойств электроизоляционной бумаги из
_____ бамбука

2. Срок сдачи студентом законченной работы: _____ 01.06.2021

3. Исходные данные по работе: литературные источники по теме исследования; предварительные исследования, проведенные в СПбПУ; образцы лабораторных отливок электроизоляционной бумаги из целлюлозы бамбука; необходимое оборудование и условия для проведения экспериментов; рекомендации по постановке цели и задач исследования.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): _____
Оценка исходных электрофизических характеристик лабораторных отливок материала и выбор партии ЭИБ для проведения термостарения. Экспериментальное исследование процесса изменения электрофизических и механических характеристик. Анализ состава по волокну опытной электроизоляционной целлюлозы из стеблей бамбука, подготовленной по технологии РФ.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): нет

6. Консультанты по работе: доцент, к.т.н. Журавлева Н.М.

7. Дата выдачи задания 08.10.2020

Руководитель ВКР _____ А.С. Резник
(подпись) _____ инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 08.10.2020
(дата)

Студент _____ Е.А. Романенко
(подпись) _____ инициалы, фамилия

Реферат

На 88 с., 57 рисунков, 11 таблиц

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БУМАЖНО-ПРОПИТАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, НАГРЕВОСТОЙКОСТЬ, СЫРЬЕВАЯ БАЗА, БАМБУК, БАКТЕРИАЛЬНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА, ЛЕСОСБЕРЕЖЕНИЕ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Исследование механических свойств электроизоляционной бумаги из бамбука».

Предметом настоящей работы является изучение влияния целлюлозы бамбука на работоспособность электроизоляционной бумаги, впервые изготовленной из указанного сырья по российской технологии.

Исследования выполняются в рамках международного договора №772 от 24.09.2017 между СПбПУ и университетом Бинь Зьонг (Социалистическая Республика Вьетнам).

Актуальность и практическая значимость темы обусловлены: выявлением перспектив применения указанного злакового растения в качестве самовоспроизводящегося сырья для производства высоковольтной ЭИБ во Вьетнаме (в перспективе, возможно, и в РФ), а также - расширением представлений о взаимосвязи особенностей целлюлозного волокна и работоспособности компонентов бумажно-пропитанной изоляции.

Исследованы электрофизические и механические свойства опытных образцов бумаги из бамбука и бактериальной целлюлозы; определен их состав по волокну; сравнительная нагревостойкость (по изменению предела механической прочности на разрыв) и сорбционная способность (оптическими методами). Результаты исследования сопоставлены с аналогичными характеристиками традиционно используемой ЭИБ из целлюлозы сосны. Полученные сведения позволили заключить, что целлюлоза бамбука являются перспективным волокном для создания высоковольтных диэлектриков, как для Республики Вьетнам (из национального сырья), так и для России. Вывод

основан на превосходстве по ряду показателей ЭИБ из бамбука (адаптируемого к климату РФ) над прототипом из сосны, что имеет существенное значение с позиции экологии и лесосбережения.

Abstract

88 pages, 57 pictures, 11 tables

KEYWORDS: PAPER-IMPREGNATED INSULATION, ENERGY EFFICIENCY, ELECTROPHYSICAL PROPERTIES, HEAT RESISTANCE, RAW MATERIAL BASE, BAMBOO, BACTERIAL CELLULOSE, FOREST CONSERVATION.

The topic of the final qualifying work is “Study of the mechanical properties of electrical insulation paper made of bamboo”.

The subject of this work is the study of the effect of bamboo cellulose on the performance of electrical insulation paper, which has been produced from the mentioned raw materials according to Russian technology for the first time.

The research is carried out within the framework of the International Agreement No 772 of 24 September 2017 between SPbPU and Binh Duong University (the Socialist Republic of Vietnam).

The relevance and practical significance of the topic are conditioned by the identification of prospects for the use of this cereal plant as a self-reproducing raw material for the production of high-voltage EIP in Vietnam (in perspective, possibly, in the Russian Federation), as well as the expansion of ideas about the relationship between the features of cellulose fibre and the performance of the components of paper-impregnated insulation.

The electrophysical and mechanical properties of experimental samples of paper made of bamboo and bacterial cellulose were investigated; their composition by fibre, comparative heat resistance (by changing the mechanical tensile strength), and sorption capacity (by optical methods) were determined. The results of the study are compared with similar characteristics of the traditionally used EIP made of pine pulp. The obtained data allowed us to conclude that bamboo cellulose is a promising fibre for the creation of high-voltage dielectrics, both for the Republic of Vietnam (from

national raw materials) and for Russia. The conclusion is based on the superiority in several indicators of EIP made of bamboo (adapted to the climate of the Russian Federation) over the prototype made of pine, which is of significant importance from the point of view of ecology and forest conservation.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
Глава 1. Литературный обзор.....	13
1.1. Востребованность и доступность целлюлозных диэлектриков в высоковольтной технике	13
1.2. Краткие сведения об электроизоляционных свойствах целлюлозной бумаги и механизме разрушения БПИ в процессе эксплуатации.....	19
1.2.1. Электрофизические характеристики ЭИБ.....	19
1.2.2. Механизм старения кабельной и трансформаторной БПИ.....	22
1.3. Основные подходы к решению проблемы повышения работоспособности БПИ.....	27
1.3.1. Модификация основы ЭИБ из целлюлозы сосны природными компонентами, имеющими сродство к целлюлозе	27
1.3.2. Электрофизические характеристики, нагревостойкость и сорбционная способность перспективного вида ЭИБ из нетрадиционного растительного сырья	36
1.4. Направление развития исследований ЭИБ из целлюлозы бамбука	39
1.5. Выводы по обзору литературы, цель и задачи работы	40
Глава 2. Методика исследования	43
2.1. Объект исследования	43
2.2. Методика определения кратковременной электрической прочности.....	43
2.3. Определение предела механической прочности на разрыв электроизоляционной бумаги.....	46
2.4. Методика проведения ускоренного термостарения опытных видов ЭИБ.....	49
2.5. Методика оценки сорбционной способности ЭИБ на основе определения коэффициента относительного светопропускания жидкости	51
2.6. Анализ состояния диэлектрических материалов с применением увеличительной техники	53
2.7. Оценка состава по волокну электроизоляционной бумаги	54
Глава 3. Экспериментальная часть.....	56
3.1. Объект исследования	56

3.1.1. Выбор исходного сырья для получения опытных образцов ЭИБ	56
3.1.2. Исходные характеристики отливок ЭИБ из волокна бамбука партий VI и VII	70
3.2. Исследование нагревостойкости опытной ЭИБ из бамбука.....	74
3.3. Оценка сорбционной способности ЭИБ из бамбука.....	78
3.4 Заключение по работе	83
Список использованных источников	85

Введение

Высокая потребность в целлюлозных диэлектриках требует не только совершенствования их свойств [1,2] и разработки более эффективных технологий получения [2 - 5], но и внимательного отношения к сырьевой базе (с позиции повышения энергоэффективности высоковольтного оборудования и в свете острой необходимости сохранения лесов). Для повышения надежности и работоспособности базовых энергетических устройств (в частности, силовых трансформаторов - СТ) необходимо, в частности, оптимизировать варианты структуры электроизоляционной бумаги (ЭИБ) с целью совершенствования её основных электрофизических свойств [2, 5 - 8]. Доказано и подтверждено многолетней практикой, что именно постепенная деструкция компонентов бумажно-пропитанной изоляции (БПИ), а также формирование и осаждение шлама во многих случаях вызывает отказ высоковольтной техники [2,6]. При этом состав по волокну и его морфологические особенности во многом определяют механическую прочность и нагревостойкость ЭИБ, то есть те важнейшие показатели, от которых зависит работоспособность СТ в целом [2, 8], потребность в которых растет по мере развития энергетики [9].

Методы диагностики текущего состояния компонентов БПИ пока недостаточно эффективны [6]. Но даже достоверная оценка не даст гарантии получения четкого представления об остаточном ресурсе БПИ и СТ в целом [2], так как отсутствует возможность учёта воздействия непредсказуемых ситуаций в электрической сети. Поэтому вполне логичной представляется необходимость разработки новых поколений ЭИБ и БПИ, отличающихся повышенной устойчивостью к воздействию эксплуатационных факторов [2, 9 - 13]. А их производство должно базироваться на экологически безопасных технологиях с применением сырья, не наносящего вред природе [12].

С данной точки зрения настоящая исследовательская работа, направленная на получение представлений о возможности использования быстрорастущего бамбука для производства электроизоляционной бумаги, выполнена на

актуальную тему, несомненно, представляющую большой **практический интерес**. Исследование, проводимое в рамках международного договора №772 от 24.09.2017 между СПбПУ (РФ) и университетом Бинь Зыонг (Вьетнам) предполагают, с одной стороны, проверить возможность применения указанного злакового растения в качестве национального сырья для производства ЭИБ во Вьетнаме, а с другой – продолжить изучение влияния особенностей волокна на характеристики целлюлозных диэлектриков.

Поэтому, в качестве **объекта исследования** рассматривается опытная электроизоляционная бумага из бамбука Юго-Восточной Азии, которая в перспективе гипотетически сможет использоваться в диэлектрических системах объектов энергетического назначения. Ввиду того, что морфология во многом определяют свойства бумаги, то влияние **волокон бамбука на работоспособность ЭИБ**, является **предметом** изучения, **цель** которого состоит: в выявлении принципиальной возможности использования данного сырья для производства диэлектрической бумаги, как компонента перспективной БПИ, отличающейся повышенной нагревостойкостью.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. проанализировать состав по волокну опытной электроизоляционной целлюлозы из стеблей бамбука, подготовленной по технологии РФ;
2. оценить исходные электрофизические характеристики лабораторных отливок материала и выбрать партию ЭИБ для проведения термостарения;
3. провести сравнительные испытания образцов ЭИБ различного состава, контролируя динамику механической прочности материалов;
4. оценить сорбционную активность отливок ЭИБ по отношению к нефтяному трансформаторному маслу;
5. сделать предварительное заключение о целесообразности развития работ данного направления.

До настоящего времени целлюлозные диэлектрики изучены далеко не в полной мере, как с позиции влияния источника целлюлозы на их

электрофизические свойства, так и с точки зрения взаимосвязи морфологических особенностей волокна с механическими характеристиками и нагревостойкостью материала [8,13,14], что на наш взгляд, существенно сужает базу исходного сырья. Недостаточно сведений о модификации бумаги (в частности, природными аналогами растительной целлюлозы) с целью повышения работоспособности компонентов БПИ и совершенствовании диагностики [15-22]. Нет достоверных сведений и о влиянии степени полимеризации целлюлозы на термоустойчивость ЭИБ [23], хотя многолетний опыт эксплуатации СТ подтверждает наличие их взаимосвязи [2, 14].

Поэтому решение задач, поставленных в настоящей магистерской диссертации, позволят расширить представления о проблемных моментах получения целлюлозного компонента высоковольтной изоляции силовых объектов, отличающихся повышенной работоспособностью. **Гипотетически** можно предположить, что успех в создании технологии диэлектриков из бамбука в перспективе будет способствовать не только повышению энергоэффективности БПИ из растительных волокон, но и использованию новой сырьевой базы (быстро возобновляемой естественным путем) для производства электроизоляционных материалов (как во Вьетнаме, так и в нашей стране), а также – лесосбережению и решению ряда экологических проблем.

Исходя из анализа сведений, приведенных в отечественной и зарубежной литературе, можно заключить что:

1. целлюлозная электроизоляционная бумага остается базовым компонентом бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) силовых объектов, обеспечивающих надежное функционирование электроэнергетики;
2. именно состояние изоляции определяет их работоспособность;
3. интенсивность разрушения компонентов БПИ и шламообразования, нарушающего теплоотвод, во многом зависит от свойств использованной целлюлозы и технологии получения электроизоляционной бумаги с учетом её возможной модификации с целью совершенствования свойств;

4. при производстве ЭИБ в РФ используется целлюлоза сосны сульфатной варки, однако «возраст рубки» этого дерева – 150-160 лет (то есть его возобновление происходит низкими темпами);

5. вырубка лесов наносит огромный ущерб экологии, негативно влияя на естественные процессы в природе;

6. предварительное изучение ЭИБ из бамбука показало перспективность расширения исследований, тем более что данное злаковое растение, отличающееся высочайшей естественной воспроизводимостью, может быть адаптировано к климатическим условиям нашей страны.

В главе 1 рассмотрены публикации [1 - 37], анализ которых подтверждает целесообразность дальнейшего изучения указанного вопроса, который представляет несомненный интерес, но **не проработан**. Наши **предварительные результаты** [2,8,16,23,26-28,30,32,33], а также перечисленные публикации отечественных и зарубежных авторов, явились **информационной основой** для выбора темы диссертации, постановки задач работы и планирования **экспериментальных исследований**. При их проведении использовались следующие **методики и оборудование**:

Состав ЭИБ по волокну определялся при помощи Fiber-Tester; предел механической прочности на разрыв оценивался с применением испытательного стенда Mark-10; определение $E_{пр}$ отливок проводилось на лабораторной пробивной установке; сорбционная способность ЭИБ анализировалась по изменению характеристик масла с помощью микроколориметра МКМФ-1 и микроскопа «Analyt» (с камерой «Celestron» - Digital Imicroscope image).

Научная новизна результатов заключается во впервые полученных сведениях о влиянии волокна бамбука и модификации ЭИБ на его основе на основные свойства и работоспособность целлюлозного компонента БПИ.

Практическая значимость работы состоит в развитии представлений, направленных на создание перспективной изоляции с целью повышения энергоэффективности силового оборудования, и в получении ценной информации о возможности расширения сырьевой базы для производства ЭИБ.

Апробация результатов исследования. Полученные результаты вошли в сообщение СПбПУ на семинаре в университете Бинь Зыонг (Вьетнам).

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Востребованность и доступность целлюлозных диэлектриков в высоковольтной технике

Природный полимер – целлюлоза (Ц) традиционно применяется в высоковольтной технике, зачастую не имея альтернативы даже при современном развитии химии синтетических высокомолекулярных соединений [1,2]. В настоящее время целлюлозные электроизоляционные материалы по-прежнему достаточно широко используются в пускорегулирующей и контролирующей аппаратуре; при изготовлении силовых кабелей (несмотря на тенденцию к замене бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) сшитым полиэтиленом), а рекомендации по полной замене электроизоляционной бумаги (ЭИБ) и картона синтетическими полимерами в конденсаторной технике пока представляются не вполне обоснованными. В области силового трансформаторостроения БПИ фактически незаменима. Действительно, в качестве изоляции проводников обмоток СТ за рубежом используется крафт-бумага (высококачественная, термоустойчивая) и различные виды бумагоподобных материалов на основе синтетики (например, Номекс). Однако, целлюлозная бумажно-пропитанная изоляция (в которой масло обеспечивает отвод тепла, повышение электрической прочности и снижение вероятности развития частичных разрядов) остается основной [1, 3].

Целлюлозные диэлектрики (ЦД) не теряют своей актуальности и преимуществ перед многими новейшими синтетическими аналогами благодаря ряду хорошо известных, ценных свойств, среди которых: широкая и возобновляемая (как естественным путем, так и благодаря целенаправленным действиям по воссозданию лесных массивов) сырьевая база; технологичность при изготовлении и эксплуатации материалов различного назначения; стабильность диэлектрических характеристик; пористость (обеспечивающая качественную пропитку диэлектрика электроизоляционными жидкостями), а также - сорбционная активность, позволяющая осуществлять очистку

пропитывающей диэлектрической среды в процессе эксплуатации (тем самым - стабилизируя органическую изоляцию по параметру тангенс угла диэлектрических потерь и замедляя темпы деструктивных явлений в компонентах БПИ) [1, 4-6].

Поэтому вопросы применения и совершенствования эксплуатационных показателей изделий с целлюлозным диэлектриком продолжают развиваться. Однако детальной проработки электрофизических свойств ЦД, особенно с учетом их морфологических особенностей, явно недостаточно [7,8]. Указанные материалы, в основном, охарактеризованы в многочисленных исследованиях с помощью: дифракции рентгеновских лучей, изотерм сорбции газообразного азота и влаги, пикнометрии гелия, механических испытаний, диэлектрической спектроскопии при различных относительных влажностях и т.п. Все перечисленные подходы не дают достоверного представления о работоспособности диэлектрика без учета ряда факторов, к числу которых относятся: источники сырья, структура и свойства конкретного вида целлюлозы, а также – нагревостойкость ЦД в среде различных пропитывающих сред. Данный пробел имеет существенное значение вследствие постоянно растущей востребованности тех электротехнических устройств, в которых целлюлозные материалы (в частности, электроизоляционная бумага) широко используются до сих пор.

Так, нет необходимости упоминать о роли силовых трансформаторов и кабелей в устойчивом развитии электроэнергетики (рис. 1.1 [9]) – ключевой отрасли, обеспечивающей функционирование различных сфер современного мира.

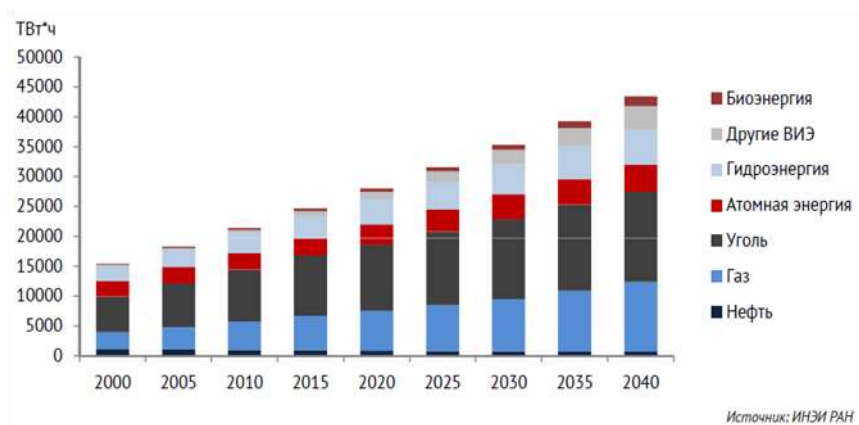


Рис. 1.1. Мировое производство электроэнергии по видам топлива, базовый сценарий [9]

Большинство СТ, используемых в энергетических системах – масляные, каждый из которых может содержать до 12-ти тонн ЭИБ и 40-ка тонн жидкого диэлектрика [3]. Поэтому актуальность и практическая значимость проблемы совершенствования их изоляции с годами только возрастает, что требует ускорения работ по созданию новых электроизоляционных систем на основе перспективных видов бумаги [10-12]. Действительно, специалистами доказано, что надежность производства и распределения электроэнергии во многом зависит именно от электрической изоляции высоковольтной техники [1, 13], которая (помимо перечисленных достоинств), имеет существенный недостаток – низкую нагревостойкость компонентов. Причем скорость разрушения БПИ при эксплуатации во многом определяется видом целлюлозы [1,14,15], рис. 1.2 [1]:

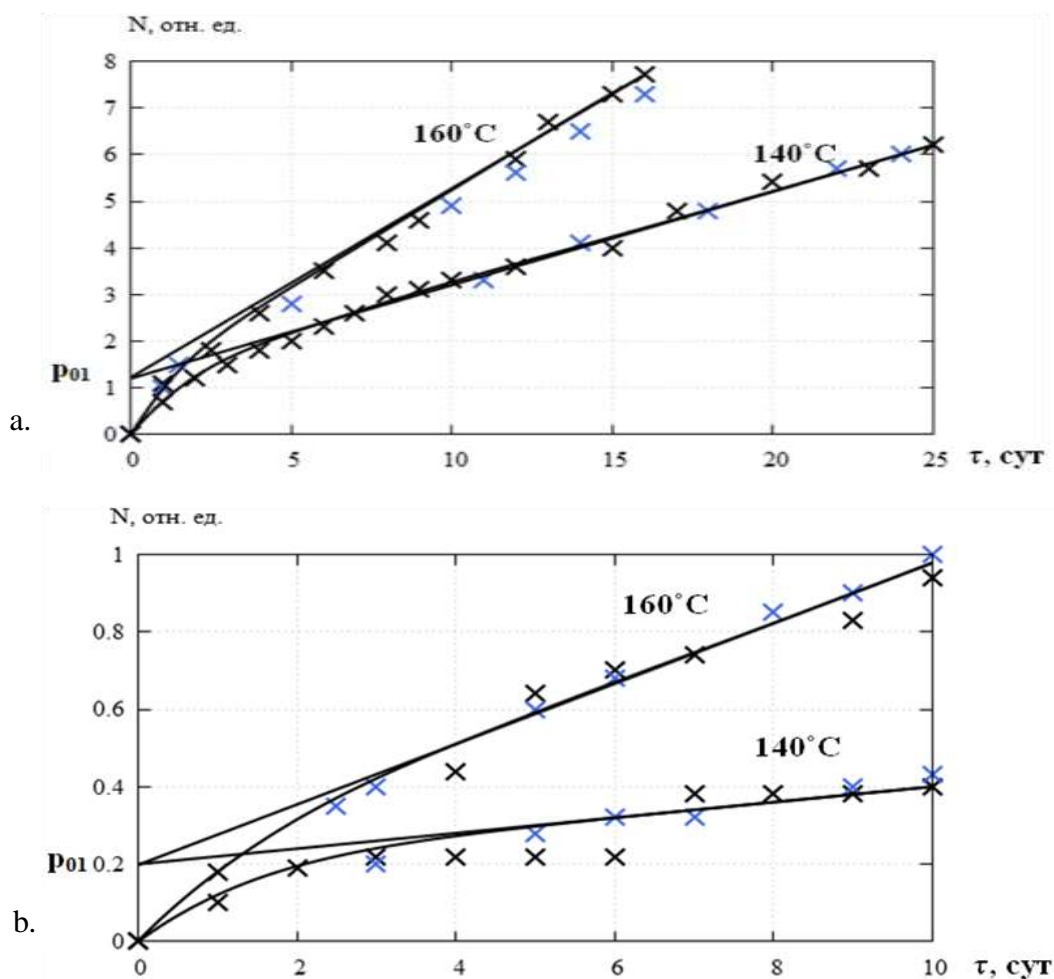


Рис. 1.2. Зависимости числа разрывов (N) молекулярной цепи целлюлозы от времени термостарения в идентичных условиях в среде нефтяного масла марки ГК [1]:

а – ЭИБ их целлюлозы сосны; б – ЭИБ из бактериальной целлюлозы,

$$N_i = (СП_0 / СП_i) - 1,$$

где: СП₀ и СП_i - исходное и текущее значения средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы в бумаге

Существенное значение имеет и тип пропитывающего состава (рис. 1.3 [1]), так как в результате термоокислительной деструкции диэлектрической жидкости ухудшаются не только ее собственные электрофизические характеристики, но и образуются продукты старения, способствующие разрушению целлюлозного компонента [1, 16, 17].

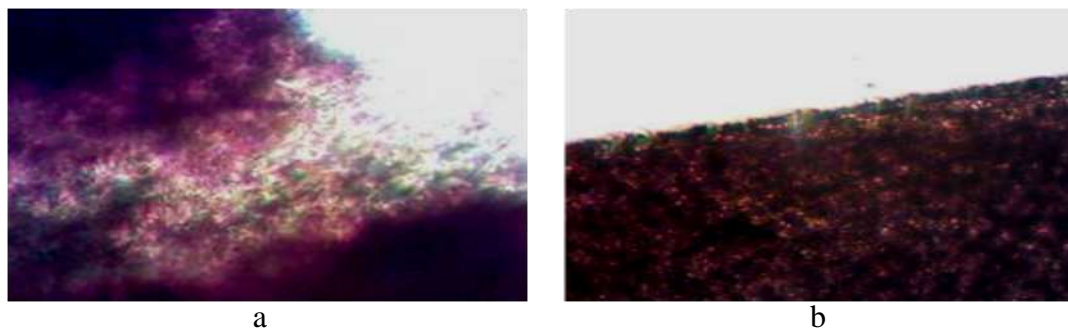


Рис. 1.3. Микрофотографии (увеличение 400х) кромки фрагментов ЭИБ марки К-120 после термостарения в идентичных условиях в среде жидких диэлектриков:
а – масло марки ГК; **б** – синтетическая жидкость Midel 7131

А образующийся шлам, интенсивность появления которого во многом зависит от химического состава пропитывающей среды (рис. 1.4 [1]), приводит к нарушению теплоотвода из-за его осаждения на изоляцию и конструктивные элементы СТ - рис. 1.5 [13].

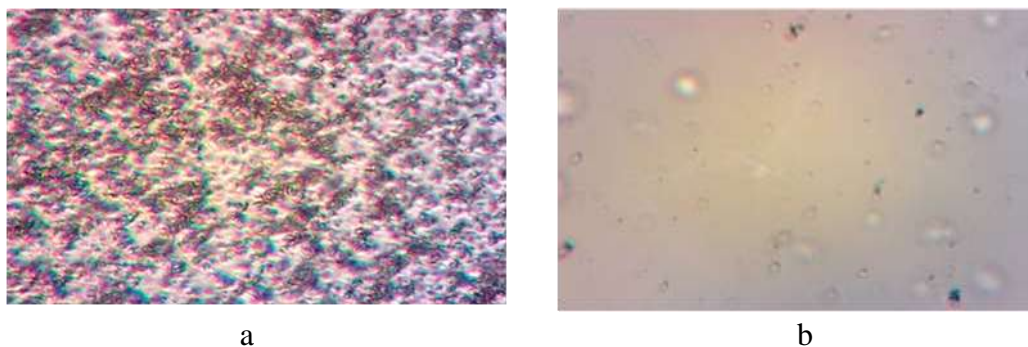


Рис. 1.4. Микрофотографии (увеличение 400х) проб трансформаторных жидких диэлектриков после термостарения в идентичных условиях в контакте с медным катализатором [1]: **а** – масло марки ГК; **б** – синтетическая жидкость Midel 7131

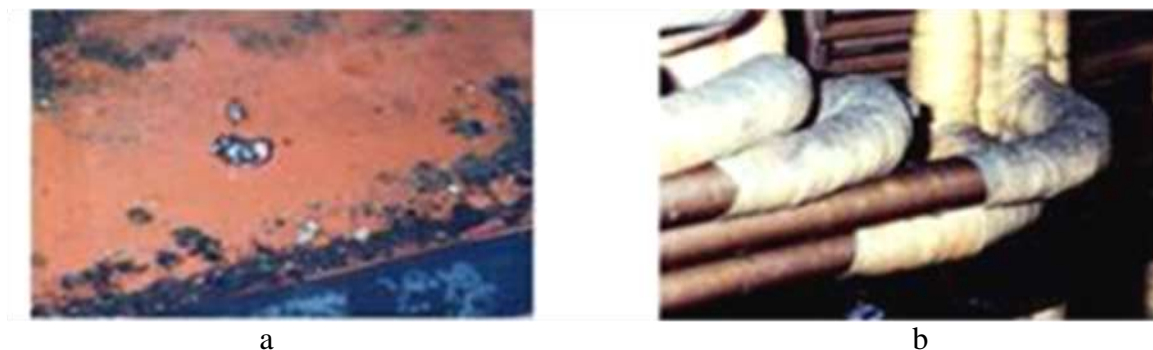


Рис. 1.5. Шлам в СТ: **а** – на активной части, **б** – на обмотках [электронный ресурс]

Поэтому повышение надежности и увеличение срока службы силовой техники требует повышенного внимания к вопросам устранения проблемных

моментов, особенно - низкой нагревостойкости компонентов БПИ, а также – к внедрению более достоверных методов диагностики её текущего состояния, в частности, определяющего работоспособность СТ.

Рассматривая вопрос **сырьевой базы** для получения ЦД, необходимо отметить, что на территорию нашей страны приходится $\frac{1}{4}$ мировых запасов древесины (производство которой постоянно растет - рис. 1.6 [18]), но она используется недостаточно эффективно. При этом мировое потребление древесной целлюлозы лесопромышленного комплекса РФ находится на высоком уровне, несмотря на влияние Covid-19 [19], что указывает на необходимость проработки задач возобновления лесных ресурсов.



Рис. 1.6. Производство древесины в РФ (данные Федеральной государственной службы статистики) [18]

Однако искусственное лесовосстановление идет низкими темпами (рис. 1.7 [18]). А на получение электроизоляционной целлюлозы (ЭИЦ) расходуется только малая часть имеющегося сырья – в основном щепы сосны, подвергнутая сульфатной обработке («варке») [20]. Необходимо отметить, что в недостаточной степени решаются и вопросы экологии, так как целлюлозно-бумажное производство относится к проблемным с точки зрения загрязнения окружающей среды.

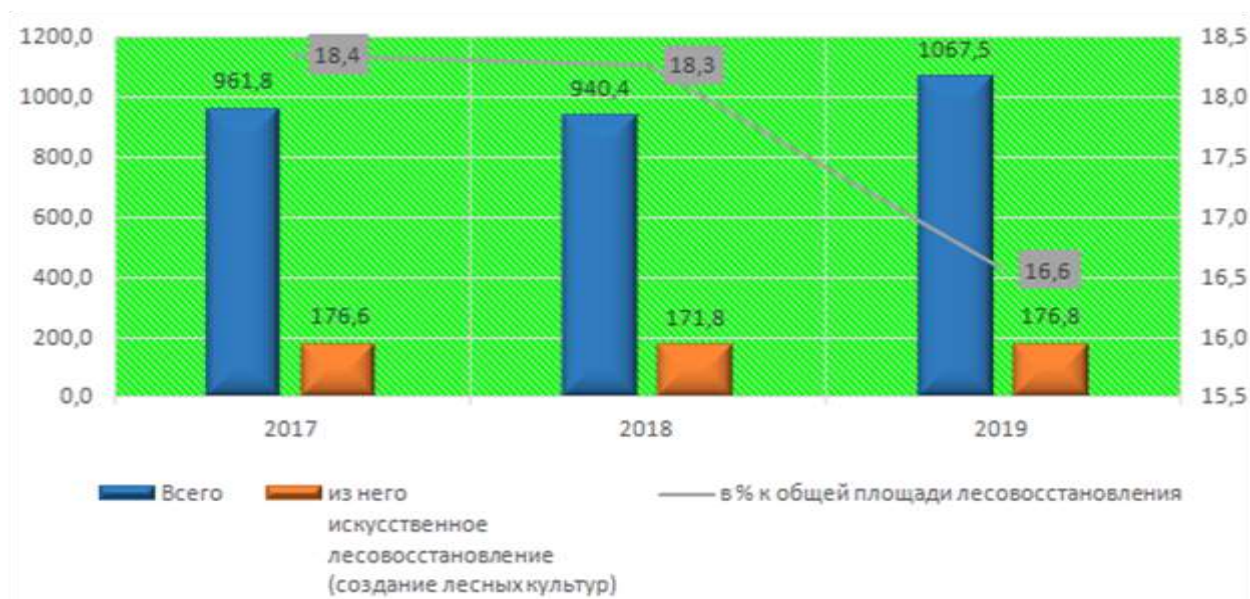


Рис. 1.7. Показатели воспроизводства лесов Российской Федерации [18]

Таким образом, перед специалистами стоит многосторонняя задача, включающая в себя, в том числе, выбор сырья для получения требуемых качеств компонентов БПИ (что непосредственно влияет на бесперебойную работу и срок службы СТ в целом). Однако достижение этой цели требует серьезной проработки особенностей старения ЭИБ в процессе эксплуатации.

1.2. Краткие сведения об электроизоляционных свойствах целлюлозной бумаги и механизме разрушения БПИ в процессе эксплуатации

1.2.1. Электрофизические характеристики ЭИБ

Многолетний опыт эксплуатации силовых трансформаторов позволяет связать их работоспособность со сроком службы изоляционной системы [13], а точнее – её компонентов. Однако трансформаторное масло (которое входит основу БПИ), хотя и оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства композиции, но может быть подвергнуто очистке и регенерации с восстановлением электроизоляционных свойств. Поэтому основная ответственность за качественное функционирование изоляции несёт её целлюлозный компонент, который не подлежит замене в случае разрушения.

Рис. 1.8 – 1.11 [1] иллюстрируют некоторые основные свойства ЭИБ. Их них следует, что значения электрической прочности ($E_{пр}$) и тангенса угла диэлектрических потерь бумаги ($\text{tg}\delta$) в процессе длительного термостарения практически не изменяются, тогда как его рост у пропитанной ЭИБ обусловлен

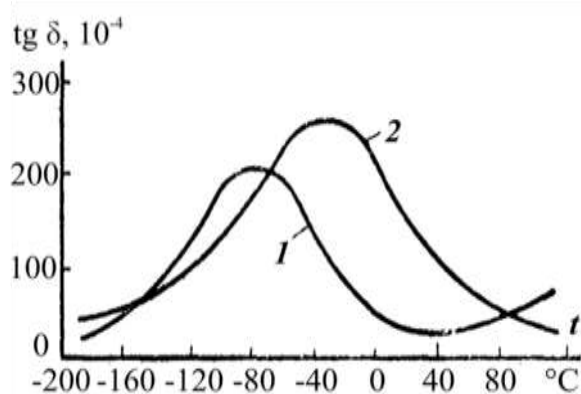


Рис. 1.8. Зависимости $\text{tg}\delta$ непропитанной бумаги от температуры при разных частотах [1]: 1 – 10^3 Гц; 2 – 10^5 Гц

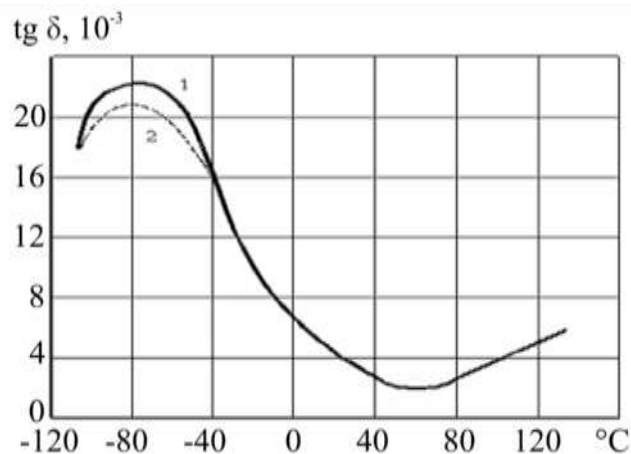


Рис. 1.9. Температурные зависимости $\text{tg}\delta$ электроизоляционной бумаги [1]: до (1) и после (2) термостарения

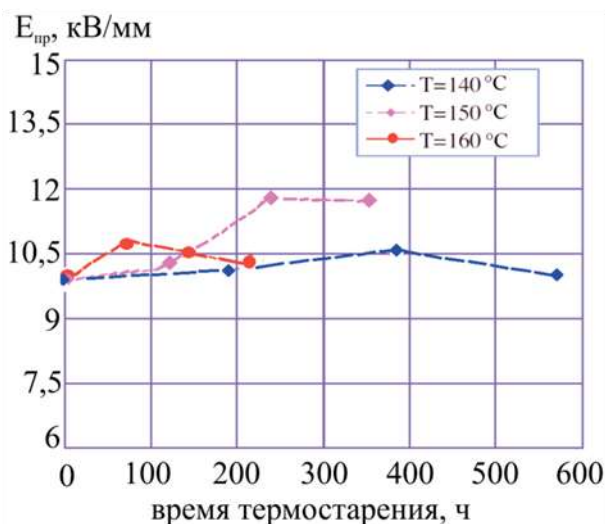


Рис. 1.10. Зависимости $E_{пр}$ ЭИБ от времени термостарения при различных температурах [21]

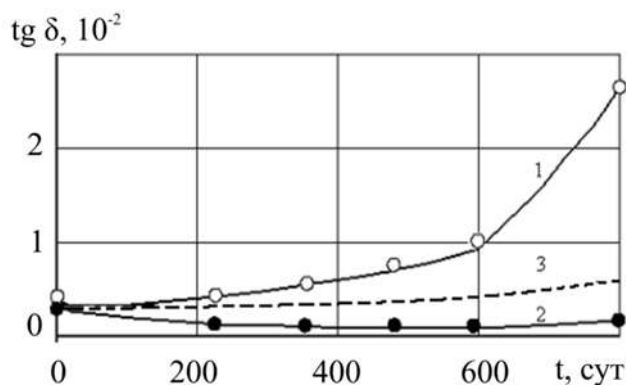


Рис. 1.11. Зависимости $\text{tg}\delta_{90^\circ\text{C}}$ ЭИБ от времени термостарения при 150°C : 1 – пропитанной нефтяным маслом; 2 – тех же образцов после удаления масла; 3 – образцов ЭИБ, состаренных в сухом состоянии [1]

термо-окислительной деструкцией масла. В то же время, средняя степень полимеризации макромолекул целлюлозы (СП) (рис. 1.12 [1]) в бумаге падает (рис. 1.13 [1]), так как происходит разрыв связей внутри и между мономерными звеньями природного полимера:

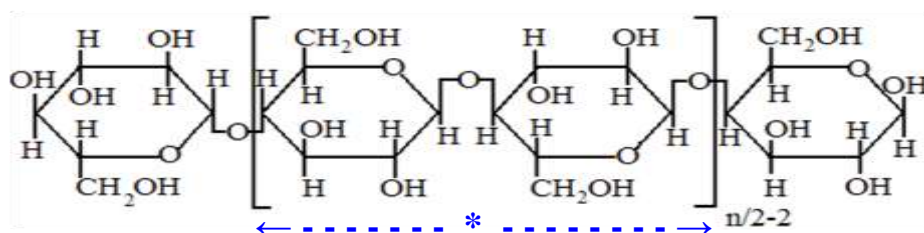


Рис. 1.12. Макромолекула целлюлозы, где [*] – мономерное звено

Как следствие, механическая прочность целлюлозного материала снижается (рис. 1.14 [21]), причем тем интенсивнее, чем выше температура старения.

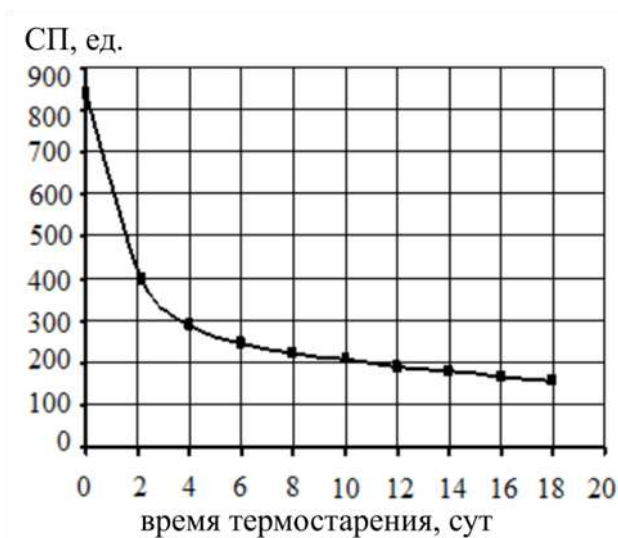


Рис. 1.13. Зависимость средней СП ЭИЦ в бумаге от времени термостарения на воздухе [1]

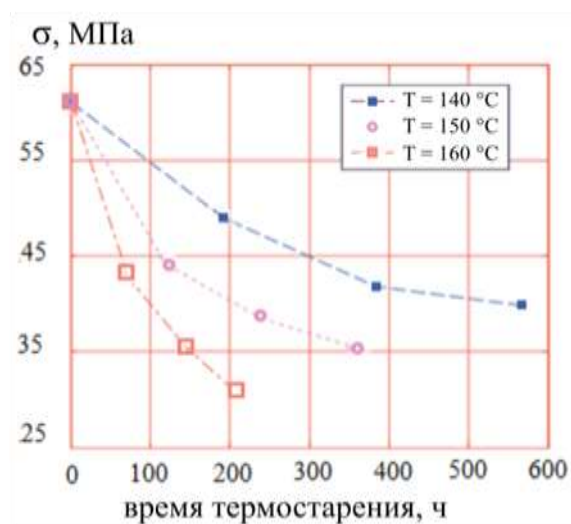
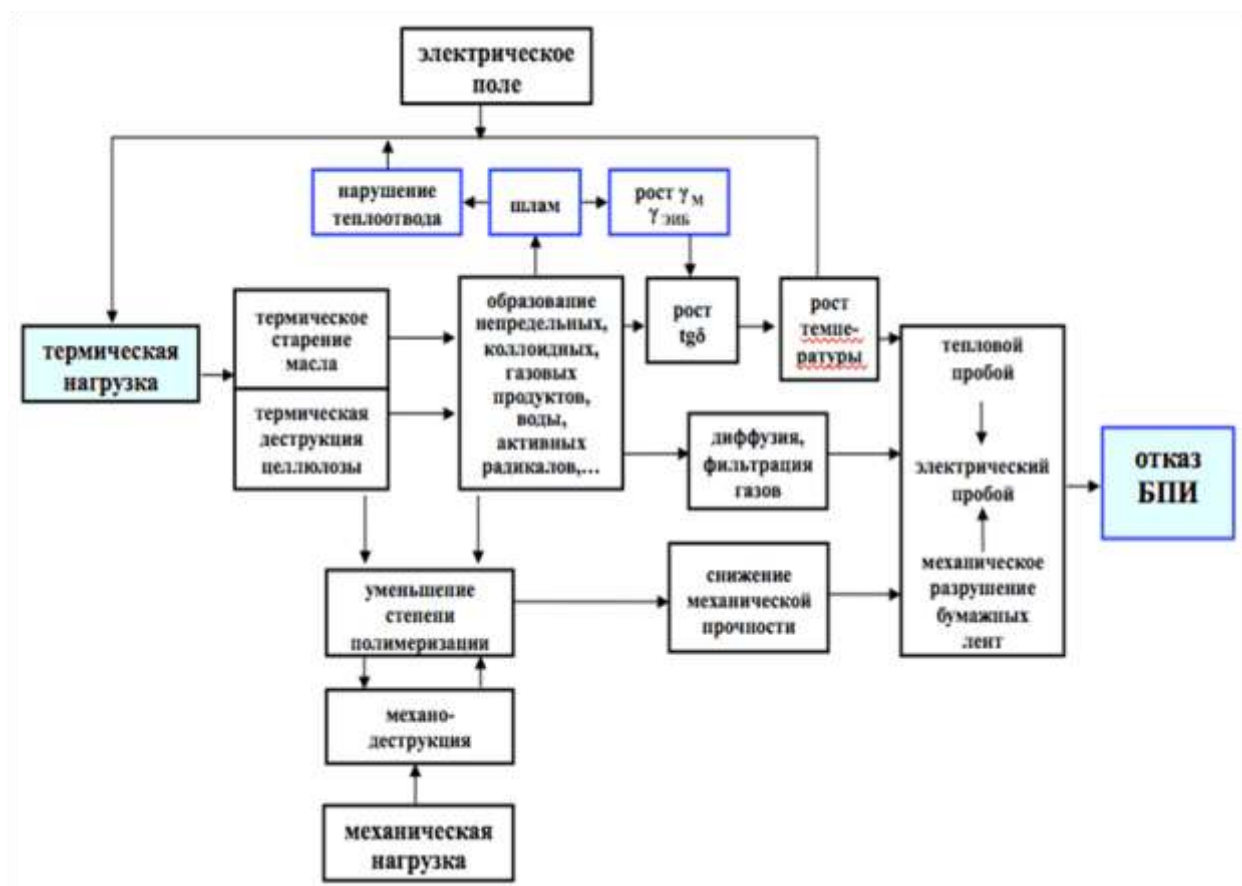


Рис. 1.14. Зависимости предел механической прочности на разрыв ЭИБ при термостарении в воздушной среде [21]

1.2.2. Механизм старения кабельной и трансформаторной БПИ



_____М.Ю. (ВНИИКП, Москва), _____Резник А.С.

Рис. 1.15. Блок-схема процессов старения БПИ [1]

Рис. 1.15. иллюстрирует блок-схему старения БПИ в силовых кабелях и СТ, в которых особое значение приобретают процессы шламообразования в масле. Относительно целлюлозной бумаги можно с большой степенью уверенности утверждать, что воздействие электрического поля на ЭИБ опосредовано термической нагрузкой. А т.к. целлюлозная бумага обладает низкой нагревостойкостью, то эта особенность данного диэлектрика является важнейшей причиной отказа изоляции. Однако, несмотря на многочисленные исследования, посвященные определению ресурса БПИ, единый взгляд на проблему отсутствует. Так, например, в работе [25] предлагается оценивать работоспособность кабелей по следующим критериям:

Таблица 1.1

Критерии работоспособности БПИ [25]

Состояние	Коэффициент абсорбции $K_a = \frac{R_{60сек}}{R_{15сек}}$	Индекс поляризации $PI = \frac{R_{10мин}}{R_{1мин}}$
Норма	$K_a > 1.6$	$PL > 4.0$
Работоспособное состояние (присутствуют незначительные отклонения)	$1.6 \Rightarrow K_a \geq 1.4$	$4.0 \Rightarrow PL \geq 3.0$
Работоспособное состояние (присутствуют значительные отклонения)	$1.4 > K_a \geq 1.25$	$3.0 \Rightarrow PL \geq 2.0$
Ухудшенное состояние	$1.25 > K_a \geq 1$	$2.0 \Rightarrow PL \geq 1.0$
Предельное состояние	$K_a \leq 1$	$PL \leq 1.0$

Авторами указанной работы также приводится классификация технического состояния кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, основанная на оценке степени её увлажнения (таблица 1.2 [25]).

В СИГРЭ связали ресурс БПИ именно с изменением СП [1] (что на наш взгляд более достоверно):

$$\text{Ресурс БПИ} = \{(1/СП_{кр} - 1/СП_0) \exp[13350/(v + 273)]\} / 8760 \text{ А};$$

где: $СП_0$ и $СП_{кр}$ - исходное и критическое (для физического состояния бумаги) значения СП; v – температура наиболее нагретой точки; A – фактор, учитывающий внешние воздействия на изоляцию

Таблица 1.2

Классификация пропитанной бумажной изоляции по степени её увлажнения [25]

Классификация	Показатель увлажнения изоляции	Содержание влаги, % (W_c)
Норма	отсутствует	$W_c < 0.5$
Работоспособное состояние (присутствуют незначительные отклонения)	низкое значение	$0.5 = < W_c \leq 1.0$
Работоспособное состояние (присутствуют значительные отклонения)	среднее значение	$1.0 = < W_c \leq 2.5$
Ухудшенное состояние	высокое значение	$2.5 < W_c \leq 3.5$
Предельное состояние	предельное значение	$W_c > 3.5$

А в работе [3] предлагается пересмотреть критерии работоспособности БПИ, основанные на критических, с точки зрения физического состояния ЭИБ, значениях её СП и механической прочности. На необходимость пересмотра их количественных значений (единого подхода к которым в мире не выработано [13]) указывается и в наших публикациях [1, 23].

Исходя из представленных взглядов на электрофизические и механические свойства целлюлозной бумаги, а также – на особенности старения БПИ, можно констатировать, что механизм разрушения данной системы изоляции в СТ включает в себя [1,13]:

- Термические процессы (вследствие нагрева током проводимости, роста диэлектрических потерь и нарушения теплоотвода при шламообразовании)
- Окислительные процессы (развивающиеся в твердом и жидком компонентах БПИ при каталитическом влиянии контакта с медными проводниками)
- Механические напряжения (возникающие из-за вибрации, а также имеющие место вследствие изгибов бумажных лент обмоток, приводящих к механодеструкции)
- Коммутационные и грозовые перенапряжения

Однако, результаты более поздних исследований [1, 23] взаимосвязи механической прочности ЭИБ с ресурсом БПИ позволяют утверждать, что вопрос далеко не исчерпан вследствие отсутствия достоверных сведений о влиянии на нагревостойкость бумаги значения исходной степени полимеризации Ц и «облачности» (то есть – неравномерного распределения целлюлозного волокна по полотну материала). Кроме того, говоря об окислительных процессах, необходимо учесть и гидрофильные особенности целлюлозы. Воду в ЭИБ воду подразделяют на 2 типа:

1 - так называемая «связанная» H_2O , которая практически является составной частью структуры целлюлозного волокна и поддается удалению только путем разрушения Ц;

2 – вода в абсорбированном или адсорбированном состоянии. Считается, что эта вода соединяется с макромолекулами Ц путем образования непрочных водородных связей с Н- и ОН-группами целлюлозных элементов и способствует увеличению их механической прочности материала. Однако H_2O должна быть удалена из бумаги перед пропиткой маслом, так как её присутствие в материале способствует развитию гидролитических процессов и снижает диэлектрические характеристики ЭИБ. Частично остаточная влага «уходит» из ЭИБ на начальном этапе термовоздействия, что приводит к образованию дополнительных водородных связей в материале и временному повышению его механической прочности.

Необходимо также учесть, что разработка новых (нагревостойких) жидких диэлектриков требует обязательной проверки их влияния на характеристики ЭИБ [24,25]. Так на рис. 1.16 [24] показаны зависимости изменения средней СП крафт-бумаги, погруженной в различные электроизоляционные жидкости (V01 и V02), от времени термостарения. А рис. 1.17 [24] иллюстрирует влияние пропитывающей среды на механическую прочность и деформационные характеристики крафт-бумаги.

Так как механизм старения и потери механической прочности бумаги является достаточно сложным и многофакторным, а коммутационные и

грозовые процессы в сети предвидеть невозможно, то прогноз срока службы трансформатора представляется малореальным.

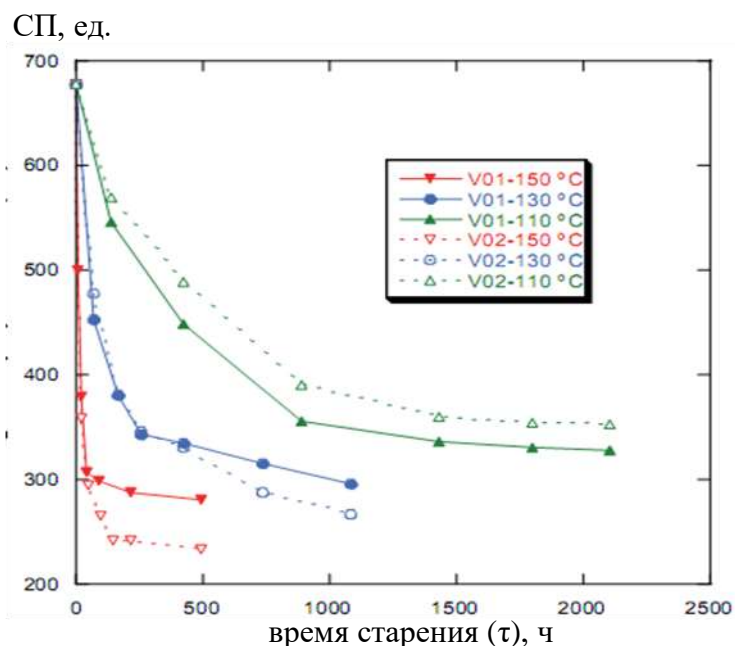


Рис. 1.16. Зависимости СП = $f(\tau)$ крафт-бумаги от времени старения при различной температуре в пропитывающих средах V01 и V02 [24]

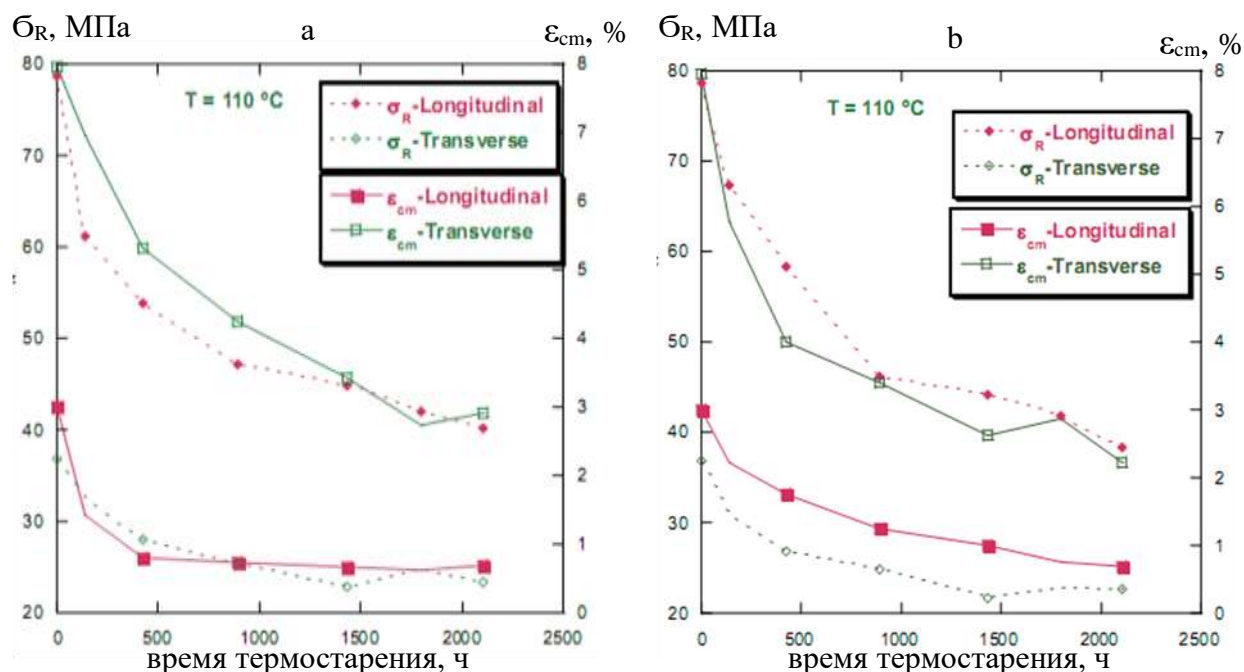


Рис. 1.17. Зависимости предела механической прочности на разрыв (σ_R) и относительного удлинения (ϵ_{cm}) образцов крафт-бумаги от времени термостарения (при 110°C) в различных жидких средах [24]: а – V01, б – V02, где **Longitudinal** – вдоль волокон; **Transverse** – поперек волокон

Поэтому задача поиска более совершенных компонентов БПИ, отличающихся повышенной механической прочностью и устойчивостью к длительному воздействию повышенных температур при эксплуатации, имеет особое значение.

1.3. Основные подходы к решению проблемы повышения работоспособности БПИ

Среди современных исследований, направленных на повышение надежности и работоспособности БПИ (а следовательно, и тех энергетических объектов, в которых используется данный вид изоляции), на наш взгляд стоит уделить особое внимание, таким направлениям, как:

1. модификация ЭИБ из традиционной целлюлозы сосны компонентами, имеющими сродство к природному полимеру и обеспечивающими повышение нагревостойкости и механической прочности ЭИБ;

2. изучение возможности использования новой сырьевой базы ЭИЦ, превосходящей целлюлозу сосны по электрофизическим свойствам и устойчивости к длительному воздействию повышенной температуры;

3. поиск новых пропитывающих диэлектрических сред повышенной нагревостойкости, совместимых с целлюлозной ЭИБ;

4. совершенствование методов диагностики текущего состояния БПИ.

Так как настоящее исследование посвящено вопросам обеспечения повышенной работоспособности целлюлозного компонента БПИ, то далее рассмотрены перспективные разработки, относящиеся к ЭИБ.

1.3.1. Модификация основы ЭИБ из целлюлозы сосны природными компонентами, имеющими сродство к целлюлозе

Как отмечалась ранее, древесина сосны (которая используется во многих странах в качестве наиболее подходящего сырья для производства ЭИБ) проходит многоэтапный процесс переработки (включая сульфатную «варку» (рис. 1.18 [20]), признанную оптимальной с точки зрения свойств будущего диэлектрика).

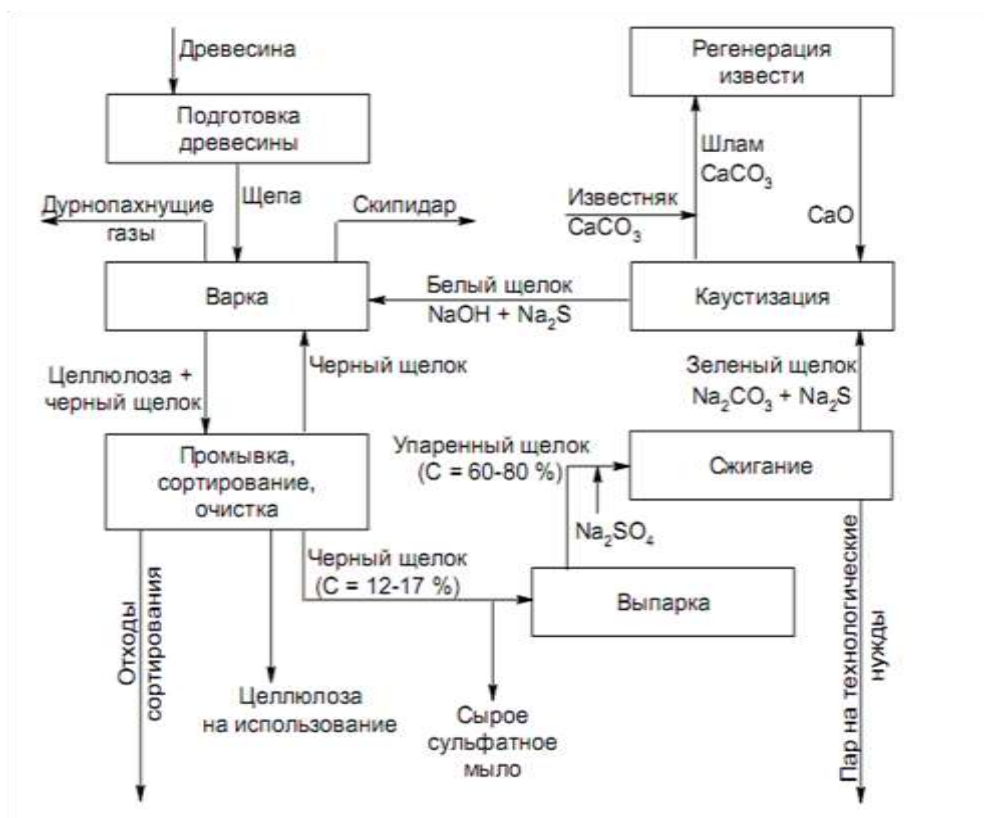


Рис. 1.18. Технологическая блок-схема получения сульфатной целлюлозы из древесины сосны [20]

Конечным продуктом данного процесса является электроизоляционная целлюлоза (ЭИЦ), которая подвергается дальнейшей обработке в зависимости от её назначения. Однако, какой бы плотности не предстояло изготовить ЭИБ, она всегда содержит сквозные воздушные включения, начиная от мельчайших в пачке макромолекул (рис. 1.19-а [1]), заканчивая пустотами между отдельными целлюлозными волокнами в бумажном полотне (рис. 1.19-б [1]). Удалить воздух прессованием (без разрушения материала) невозможно, вследствие чего ЭИБ используют в пропитанном состоянии. Заполнение пустот электроизоляционной жидкостью обеспечивает существенное повышение электрической прочности диэлектрика.

Однако с добиться не только роста $E_{пр}$, но и механической прочности бумаги, а также – повышения её устойчивости к длительному воздействию высокой температуры и сорбционной активности можно путем модификации бумажного полотна структурообразующими природными полимерами,

обладающими сродством к целлюлозе. Разработки кафедры «ТВН, ЭИКК» СПбПУ [26 - 29] подтвердили данное утверждение.

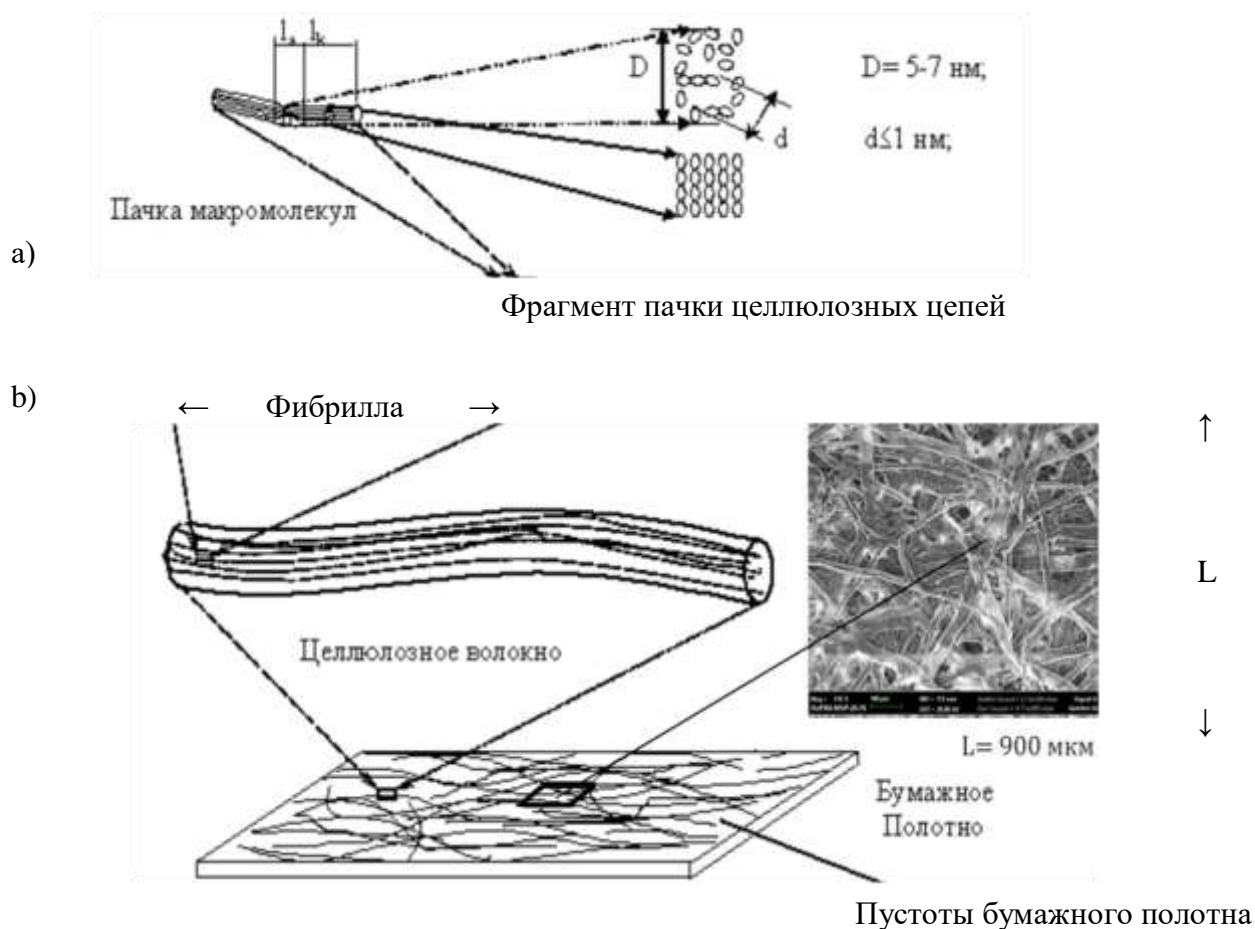


Рис. 1.19. Фрагменты схемы формирования полотна ЭИБ [1], где: D – диаметр пачки макромолекул Ц; d – диаметр воздушной поры; $l_k = 17 \text{ нм}$ и $l_a = 3 \text{ нм}$ – средняя длина кристаллического и аморфного (соответственно) участков пачки макромолекул целлюлозы

I. Модификация полотна ЭИБ биополимером «хитозан» (Ch)

Поиск путей использования Ch с целью совершенствования свойств ЭИБ начался в ЛПИ (ныне СПбПУ) еще в 70-е годы прошлого века [26]. Интерес к данному биополимеру (получаемому, в основном, из панцирей креветок и крабов) был вызван тем фактом, что хитозан является полным структурным аналогом целлюлозы (рис. 1.20):

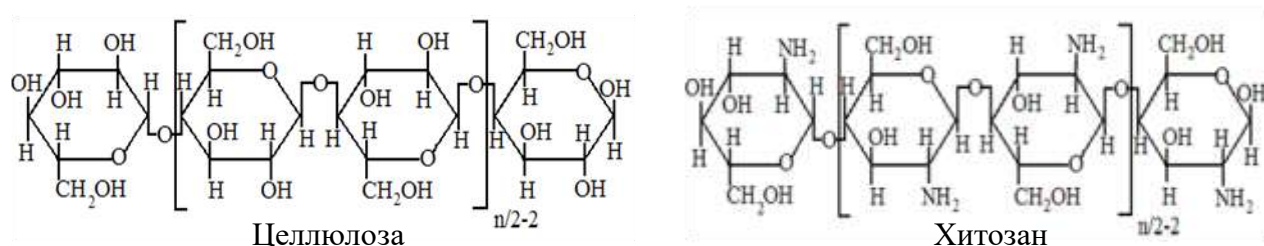


Рис. 1.20. Структурные формулы макромолекул природного полимера целлюлозы и хитозана

Прогноз положительного влияния введения Ch в состав бумажного полотна базировался на предположении о заполнении пустот между волокнами сосны более короткими цепями биополимером (рис. 1.21 [5]):

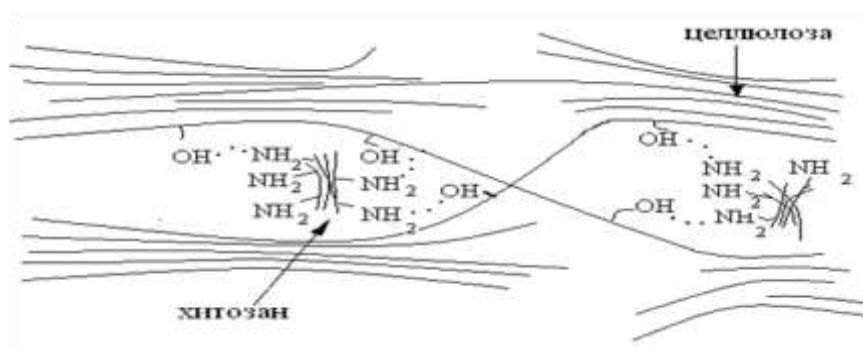


Рис. 1.21. Гипотетическая схема структурирования целлюлозного полотна ЭИБ хитозаном [5]

Предварительные результаты испытаний подтвердили целесообразность указанной модификации, а более поздние наши исследования двух партий лабораторных отливок опытной ЭИБ [1, 27] продемонстрировали возможность использования с данной целью вместо чистого Ch хитин-глюкановый комплекс (ХГК) из отходов производства лимонной кислоты (что расширяет сырьевую базу модификатора при сохранении эффективности его применения). Так, на рисунке 1.22 [1] представлены результаты определения электрической прочности 1-ой партии отливок ЭИБ традиционного исполнения и модифицированной ХГК.

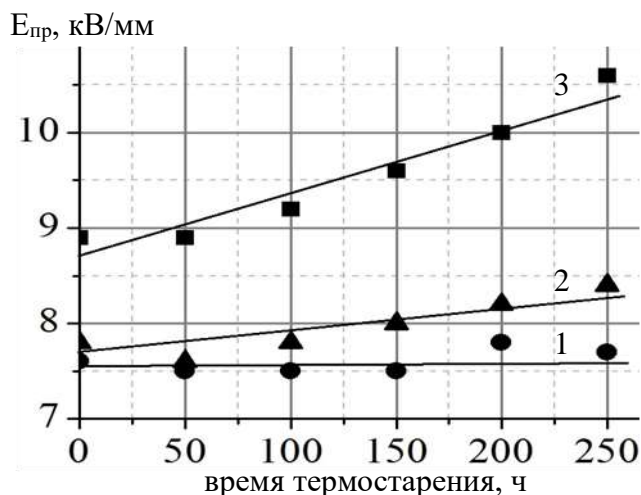


Рис. 1.22. Зависимости $E_{пр}$ опытных отливок ЭИБ (партия 1) от времени термостарения при 140°C в сухом состоянии [1]: 1 - ЭИБ из 100% ЭИЦ сосны; композиты состава: 2 – 95% ЭИЦ + 5% ХГК; 3 – 90% ЭИЦ + 10%ХГК

Важно отметить, что если $E_{пр}$ ЭИБ из ЭИЦ сосны (1) при термостарении практически не изменилась (т.к. пробой развивается преимущественно по воздушным включениям), то электрическая прочность композита (2 и особенно 3) в исходном состоянии оказалась выше, чем у монобумаги, а в ходе испытаний возрастала (предположительно, по мере образования дополнительных водородных связей между группами $-\text{OH}$ ЭИЦ и $-\text{NH}_2$ Ch).

Модификация целлюлозного полотна ЭИБ при помощи ХГК также привела к повышению предела механической прочности на разрыв в исходном состоянии и к замедлению снижения прочности в процессе термостарения (табл. 1.3 [1,30]), т.е. к повышению нагревостойкости целлюлозного диэлектрика.

Таблица 1.3

Средние значения $\sigma_{\text{разр}}$ отливок ЭИБ (партия 1) в исходном состоянии [1]

Номер и состав опытной отливки ЭИБ	$h_{\text{ср}}$, мкм	$\sigma_{\text{разр ср}}$, МПа, исходная	$\sigma_{\text{разр ср}}$, МПа, конечная*
№1 – отливка ЭИБ из 100% ЭИЦ	145 ± 3	21,3	7,0
№2 – композит состава 95% ЭИЦ + 5% ХГК (1)	140 ± 4	16,5	12,5
№3 – композит состава 95% ЭИЦ + 5% ХГК (2)	142 ± 3	29,5	30,5

* значения характеристики на момент окончания испытаний – 250 часов старения при температуре 140°C в воздушной среде

При изготовлении второй партии отливок композита (образец №3) была отработана технология введения модификатора, что привело к значительному повышению механической прочности и нагревостойкости композита: за время испытания значение его $\sigma_{\text{разр ср}}$ практически не изменилось (за счет образования дополнительных водородных связей между ЭИБ и ХГК по мере удаления воды из целлюлозы), тогда как у монобумаги (образец №1) снизилось в 3 раза. А полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа снимки структуры образцов модифицированной бумаги наглядно подтвердили гипотезу о расположении «пучков» волокон ХГК в пустотах целлюлозной сетки бумажного полотна (рис. 1.23 [1]).

Целлюлозное волокно ↓

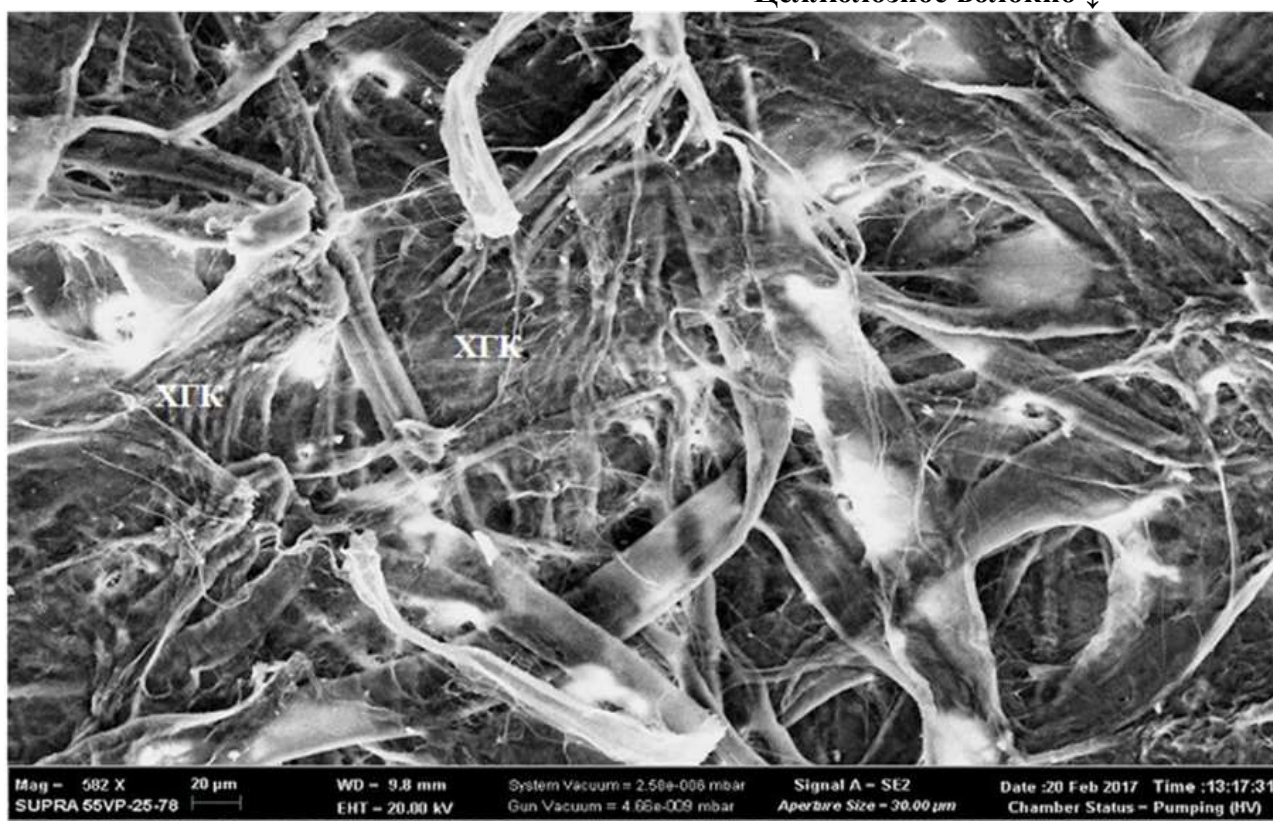


Рис. 1.23. SEM-снимок (582x) образца №2.4 – отливка (95 % ЭИЦ + 5 % ХГК) [1]

II. Использование nano-гель пленки (НГП) бактериальной целлюлозы (БЦ) для структурирования полотна ЭИБ

Одним из перспективных направлений совершенствования свойств целлюлозных диэлектриков является внедрение в их состав волокон бактериальной целлюлозы – БЦ [28-30], которую производят особые штаммы бактерий (в нашем случае использовалась - БЦ СКР, синтезированная в ИВС РАН штаммом бактерий *Comagataeibacter rhaeticus*, номер В - 13015 во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов в виде nano-гель пленки).

Структурные формулы растительной и бактериальной целлюлозы абсолютно идентичны. Однако морфология волокон различна с точки зрения надмолекулярной организации. Имеет место и существенная разница соотношения их толщин (рис. 1.24 [30]). В результате введения БЦ в массу электроизоляционной целлюлозы в процессе изготовления бумаги значительно повышается электрическая прочность диэлектрика. Однако наибольшие

значения $E_{пр}$ продемонстрировали высушенные на воздухе фрагменты нано-гель пленки БЦ (рис. 1.25 [30]).

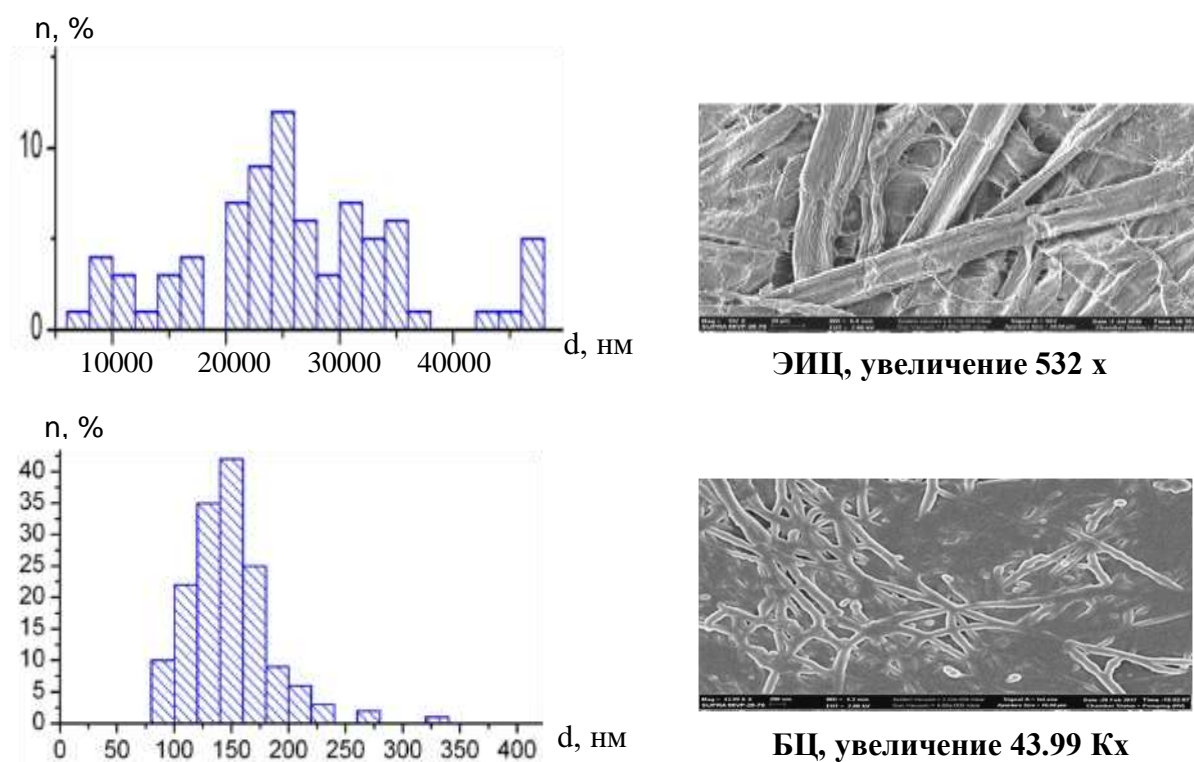


Рис. 1.24. Распределение по толщинам волокон и SEM-кадры структур ЭИБ из растительной ЭИЦ и БЦ [30]

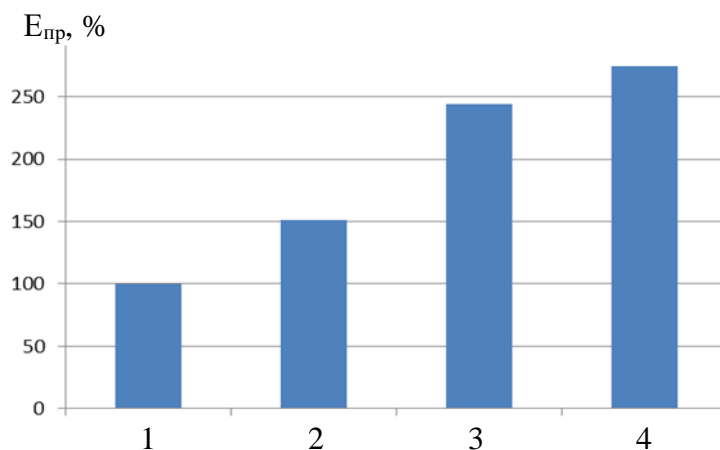


Рис. 1.25. Соотношение значений $E_{пр}$ отливок целлюлозных диэлектриков [30]:
 1 – монобумага из 100% ЭИЦ сосны; 2 – композит состава 90% ЭИЦ + 10% БЦ;
 3 – монобумага из 100% БЦ; 4 – высушенная на воздухе нано-гель пленка БЦ

Необходимо отметить, что наши более поздние исследования выявили, что использование нетрадиционного размола НГП БЦ (при помощи промышленного дезинтегратора JTC OmniBlend I, модель TM-767) позволяет

достичь более равномерного распределения тончайших волокон биополимера внутри сетки из растительной целлюлозы (рис. 1.26 [30]) и более значимого повышения $E_{пр}$ композита по сравнению с монобумагой из 100% ЭИЦ сосны при меньшем содержании БЦ:

Размол БЦ в традиционной используемом для измельчения целлюлозы ролле

Валлея:

$E_{пр}$ композита 90% ЭИЦ + 10% БЦ > $E_{пр}$ ЭИБ из 100% ЭИЦ сосны на 86%

Размол БЦ промышленным дезинтегратором:

1. исходное состояние

$E_{пр}$ композита 90% ЭИЦ + 10% БЦ > $E_{пр}$ ЭИБ из 100% ЭИЦ сосны на 86%

2. после старения в течение 600 ч при температуре 140°C

$E_{пр}$ композита 92.5% ЭИЦ + 7.5% БЦ > $E_{пр}$ ЭИБ из 100% ЭИЦ сосны на 100 %

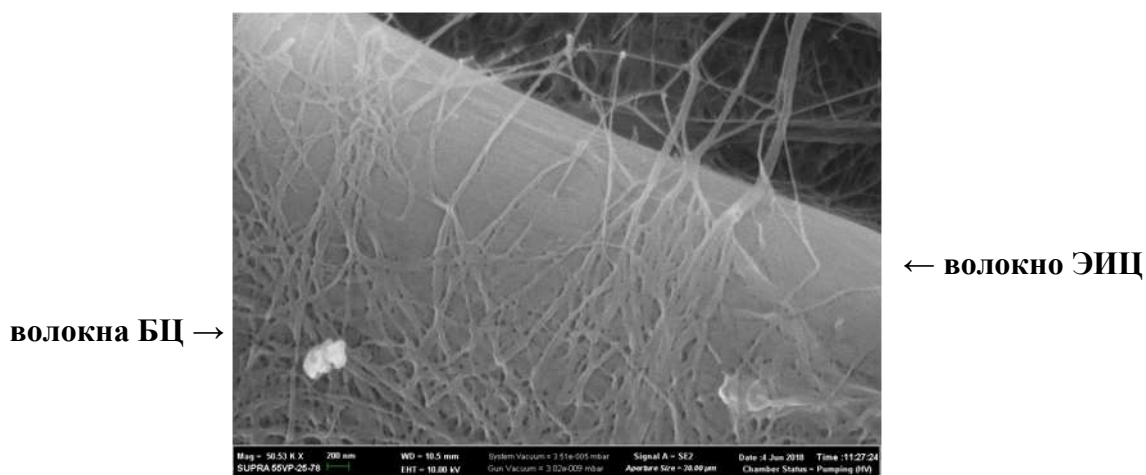


Рис. 1.26. SEM-кадр (увеличение 50,53 Kx) фрагмента структуры композита состава 92,5% ЭИЦ + 7,5% БЦ

То есть в процессе термовоздействия, как и в случае структурной модификации ЭИБ при помощи ХГК, наблюдался рост $E_{пр}$, по-видимому, за счет образования дополнительных водородных связей между волокнами растительной и бактериальной целлюлозы. Структурирование полотна бумаги БЦ положительно сказалось и на механической прочности диэлектрика, а также – на его устойчивости к длительному воздействию повышенной температуры (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Средние значения механической прочности на продавливание (P) и предела механической прочности на разрыв ($\sigma_{\text{разр}}$) опытных отливок ЭИБ

Состав отливки ЭИБ	$P_{\text{ср}}$, кПа	$\sigma_{\text{разр ср}}$, МПа, исходное состояние	$\sigma_{\text{разр ср}}$, МПа, конечное состояние*
100 % ЭИЦ сосны	2,5	15,5	9,8
92.5% ЭИЦ + 7.5% БЦ	4,8	38,9	20,7

* режим старения: 860 часов на воздухе при температуре 140°C

Таким образом, рассмотренные частные примеры модификации диэлектрической бумаги из электроизоляционной целлюлозы сосны биополимерами представляется перспективным направлением совершенствования важнейших электрофизических характеристик ЭИБ, её нагревостойкости и работоспособности.

1.3.2. Электрофизические характеристики, нагревостойкость и сорбционная способность перспективного вида ЭИБ из нетрадиционного растительного сырья

На протяжении многих десятилетий в России исследуют (а в ряде случаев – используют) различные виды растительного сырья для производства бумаги. Однако, как уже отмечалось, оптимальной с точки зрения требуемых электрофизических характеристик конечного продукта – целлюлозных диэлектриков в настоящее время признана древесина сосны. Однако, в странах Юго-Восточной Азии с этой целью используют и бамбук [31].

В СПбПУ были проведены предварительные исследования [32, 33] промышленной электроизоляционной бумаги (полученной из Бенгальской национальной электротехнической компании - **The Bengal Electricals Limited**) из указанного растения.

Таблица 1.5

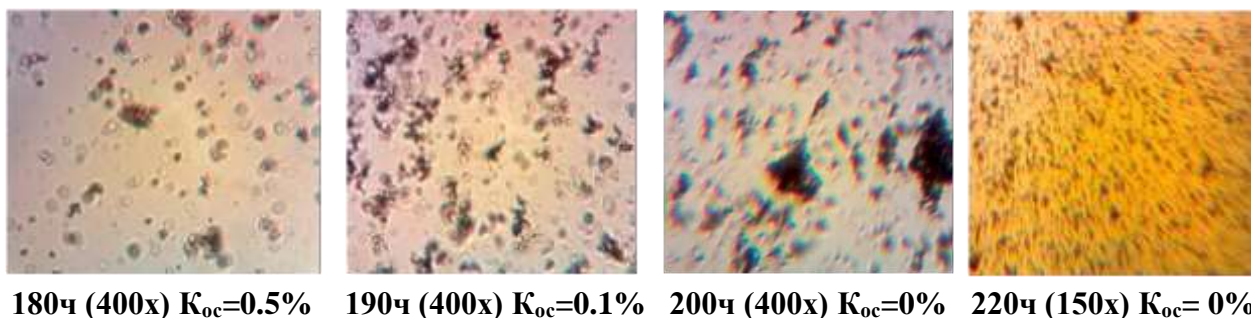
Сравнительные характеристики промышленной ЭИБ из сосны и бамбука

Состав промышленной ЭИБ ($h_{\text{ср}} = 140$ мкм)	$E_{\text{пр ср}}$, кВ/мм		$\sigma_{\text{разр ср}}$, МПа	
	исходное состояние	после старения	исходное состояние	после старения
100% волокон сосны	$9,0 \pm 0,3$	$10,8 \pm 0,5$	$45,1 \pm 0,8$	$96,8 \pm 8,3$
100% волокон бамбука	$9,1 \pm 0,2$	$10,6 \pm 0,4$	$46,8 \pm 1,7$	$76,3 \pm 4,1$

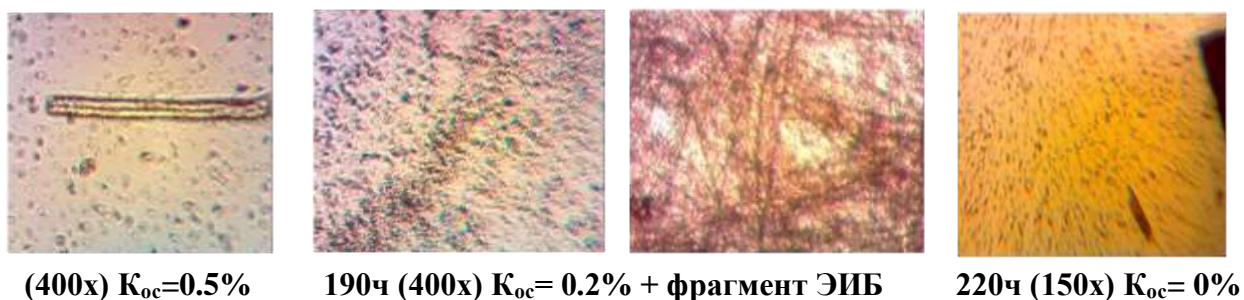
Полученные результаты показали, что ЭИБ из бамбука в среднем по $E_{\text{пр}}$ превосходит аналог из сосны (как минимум, на 15%), но в 2 раза уступает по механической прочности. В то же время, в процессе старения при температуре 140°C $\sigma_{\text{разр ср}}$ ЭИБ из сосны упал на 22%, тогда как у ЭИБ из бамбука на 4% увеличился, что свидетельствует о повышенной нагревостойкости материала.

Кроме того, была проведена сравнительная оценка сорбционной активности указанных видов целлюлозы, т.е. способности очищать жидкий диэлектрик от продуктов старения (тем самым замедляя деструкцию компонентов БПИ). С этой целью было проведено термостарение образцов бумаги в трансформаторном нефтяном масле марки ГК (в присутствии меди (Cu) – катализатора процессов деструкции), в ходе которого определялся коэффициент относительного светопропускания ($K_{\text{ос}}$) проб жидкости на длине волны 458 нм. Помимо этого пробы масла изучались при помощи увеличительной техники (рис. 1.27 [1]).

Термостарение трансформаторного масла ГК +Cu без бумаги



Термостарение трансформаторного масла ГК +Cu + ЭИБ из 100% ЭИЦ сосны



Термостарение трансформаторного масла ГК +Cu + ЭИБ из 100% ЭИЦ бамбука

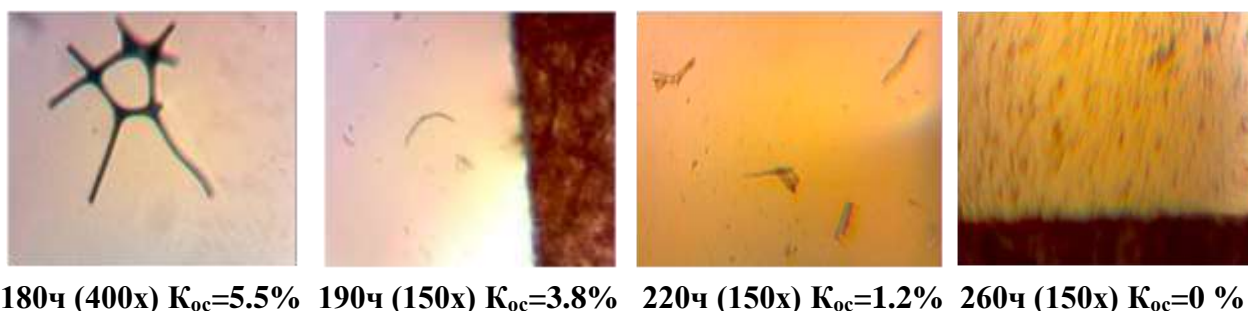


Рис. 1.27. Микрофотографии проб трансформаторного масла марки ГК после термостарения в контакте с медным катализатором и исследуемыми видами ЭИБ

Представленные кадры наглядно демонстрируют повышенную нагревостойкость и сорбционную активность ЭИБ из бамбука. Действительно, светопропускание пробы масла, которая старилась (при температуре 140°C) без бумаги, упало до 0.1% уже через 190 ч испытаний, и до 0% - через 200 ч. В случае старения жидкости в контакте с отечественной ЭИБ из сосны K_{oc} 458 пробы составил 0 % через 220 часов старения, а в случае контакта масла с ЭИБ из бамбука – через 260 ч. Видно, что отдельные волокна обеих видов бумаги фиксируются в жидкости через одинаковое время термовоздействия (180 ч). Однако видно, что фрагмент ЭИБ из сосны частично разрушен через 190 ч

старения, тогда как ЭИБ из бамбука и через 260 ч испытаний деструктирована незначительно.

1.4. Направление развития исследований ЭИБ из целлюлозы бамбука

Из представленных литературных сведений (в том числе – публикаций СПбПУ) следует, что изучение ЭИБ из целлюлозы бамбука весьма перспективно с точки зрения повышения работоспособности целлюлозных диэлектриков. Но любые растительные полимеры имеют индивидуальные морфологические особенности и формируют надмолекулярную структуру, существенно влияющую на характеристики материала в целом. Поэтому сорт бамбука и место его произрастания может сказаться на конечном результате.

Поэтому между СПбПУ и университетом Бинь Зьонг (Социалистическая республика Вьетнам) был заключен договор №772 от 24.09.2017, в соответствии с которым проводятся исследования опытной ЭИБ из бамбука, источником которого является указанная страна (на данном этапе - без учёта конкретного сорта растения). Настоящая магистерская диссертация выполняется в рамках данного междугороднего договора.

Однако результаты исследования представляют интерес и для нашей страны, так как расширяют представления о влиянии источника целлюлозы, его химических и морфологических особенностях на электрофизические свойства и нагревостойкость бумаги. Кроме того, известно, что бамбук произрастает и в некоторых регионах России, в частности, очень активно на Курильских островах и юге Сахалина [34].

А также – в Краснодарском крае, Дагестане, Кавказском регионе и Карачаево-Черкесии [36]. Искусственное разведение бамбука возможно и в Европейской части нашей страны [36]. Причем бамбук достаточно хорошо переносит холодное время года - рис. 1.28 [37].



Рис. 1.28. Бамбук в России зимой [37]

В настоящее время исследования целесообразности использования этого злакового растения для получения ЭИБ нового поколения только начинаются. Однако в случае успеха можно не только развить знания в области целлюлозных диэлектриков, но и, вполне вероятно, найти альтернативу древесине сосны (тем самым сократив истребление леса и получив быстро возобновляемое сырьё для производства растительных полимеров и материалов на их основе).

1.5. Выводы по обзору литературы, цель и задачи работы

Основываясь на анализе представленных литературных сведений можно утверждать, что:

1. современный уровень развития электроэнергетики предъявляет высокие требования к бесперебойному энергоснабжению потребителей, а также – к повышению энергоэффективности и ресурса высоковольтной техники;
2. надежная и долговременная работа силовых трансформаторов и кабельных линий в значительной степени зависит от совершенства системы их электрической изоляции, правильного выбора и качества используемых диэлектрических материалов и компонентов;

3. увеличение мощности генерирующего оборудования неизбежно приводит к усилению вредоносных воздействий, оказывающих негативное влияние на компоненты изоляционной системы в процессе эксплуатации, в связи с чем требуется существенная модернизация используемых материалов и создание новых, отличающихся повышенной электрической и механической прочностью, а также - стойкостью к тепловым и термомеханическим нагрузкам и, как следствие, длительной работоспособностью;

4. так как целлюлозные диэлектрики, обладающие рядом неоспоримых преимуществ перед синтетическими полимерами, являются основой базовой (бумажно-пропитанной) изоляции СТ, то создание новых, более совершенных, видов ЭИБ (в том числе – за счет модификации целлюлозной основы биоконпонентами и использования нестандартных сырьевых источников) в перспективе может способствовать повышению энергоэффективности высоковольтной техники с данным видом изоляции;

5. расширение сырьевой базы электроизоляционных материалов, в частности, в результате развития поисковых работ по изучению свойств опытных видов ЭИБ из злаковых растений (отличающихся высокой скоростью самовозобновления) способствует лесосбережению, а также - решению важнейших экологических проблем.

Однако бумажно-пропитанная изоляция имеет и существенный недостаток – низкую нагревостойкость компонентов, которая проявляется, прежде всего, в постепенном разрушении жидкого и твердого диэлектриков, шламообразовании и снижении механической прочности бумаги. Причем скорость разрушения компонентов БПИ при эксплуатации во многом определяется видом использованной целлюлозы. Поэтому изучение опытной ЭИБ, **впервые** изготовленной из стеблей бамбука (Вьетнам) по российской технологии получения электроизоляционной целлюлозы перспективно, как для стран Азии (которые имеют обширную, быстро возобновляемую сырьевую базу и низкую себестоимость ресурса), так и для России (с точки зрения

расширения представлений о взаимосвязи характеристик волокна с важнейшими свойствами ЭИБ, а также – в свете возможности адаптации бамбука к местным условиям и, тем самым, расширения отечественной сырьевой базы для производства целлюлозных диэлектриков).

Вышеизложенные выводы формируют **цель** диссертационной работы:

на основе экспериментальных исследований новых видов модифицированных целлюлозных диэлектриков выявить возможность использования волокна бамбука для производства диэлектрической бумаги - компонента перспективной БПИ, отличающейся повышенной нагревостойкостью и сорбционной активностью.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. проанализировать состав по волокну опытной электроизоляционной целлюлозы из стеблей бамбука, подготовленной по технологии РФ;
2. оценить исходные электрофизические характеристики лабораторных отливок материала и выбрать партию ЭИБ для проведения термостарения;
3. провести сравнительные испытания образцов ЭИБ различного состава, контролируя динамику механической прочности материалов;
4. оценить сорбционную активность отливок ЭИБ по отношению к нефтяному трансформаторному маслу;
5. сделать предварительное заключение о целесообразности развития работ данного направления.

Глава 2. Методика исследования

2.1. Объект исследования

В качестве объекта исследования были рассмотрены:

- 1 - промышленные образцы электроизоляционной бумаги;
- 2 - опытные отливки ЭИБ, изготовленные в лабораторных условиях.

1. Использовались:

- образцы ЭИБ из бамбука, полученные из Бенгальской национальной компании;
- образцы ЭИБ из целлюлозы сосны сульфатной варки, используемой в высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов.

2. Отливки ЭИБ из целлюлозы стеблей бамбука (полученного из Социалистической республики Вьетнам):

- опытная монобумага из целлюлозы бамбука (без учета его сорта);
- композит из целлюлозы бамбука и бактериальной целлюлозы

Необходимо отметить, что электроизоляционная целлюлоза (ЭИЦ) **впервые** была получена сотрудниками ИВС РАН и СПбГЛТУ по технологии отечественных целлюлозных диэлектриков. Первоначальная стадия создания отливок ЭИБ (которые были изготовлены в СПбГУПТД) включала в себя исследование и выбор целлюлозного волокна, что подробно рассмотрено в Главе 3.

2.2. Методика определения кратковременной электрической прочности

Кратковременная электрическая прочность ($E_{пр}$) исследуемых образцов целлюлозных диэлектриков определялась с целью получить сравнительную информацию об одной из основных электрофизических характеристик традиционной используемых и опытных видах ЭИБ. Испытания проводились на нестандартной (лабораторной) высоковольтной пробивной установке переменного напряжения (50 Гц - рис. 2.1) использование которой обеспечивало регистрацию значения пробивного напряжения и его плавный подъем (в автоматическом режиме).

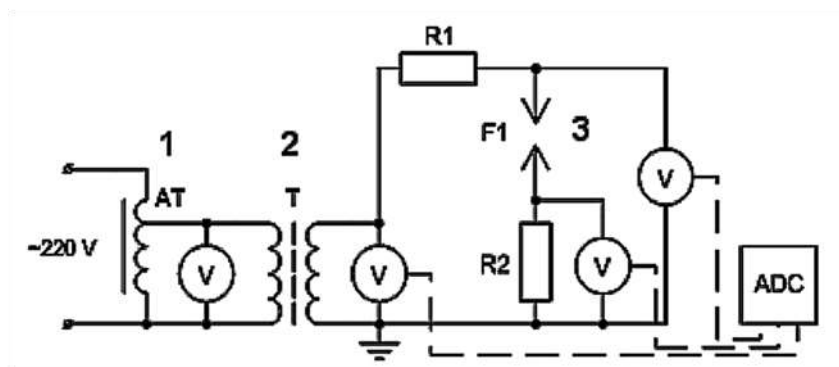


Рис. 2.1. Схема высоковольтной пробивной установки:
1 – автотрансформатор; 2 – высоковольтный трансформатор;
3 – 2-х электродная измерительная ячейка

Пробивная установка (рис. 2.1), также содержала резистор (R_1), ограничивающий максимальную величину тока через образец и резистор (R_2), измерения падения напряжения на котором, определяло величину тока через образец. Для обеспечения безопасности участников измерения и измерительного оборудования в ходе проведения опытов к выходному измерительному контуру были подключены предохранители и делители напряжения, не обозначенные на схеме (рис 2.1).

На рис. 2.2. представлена схема 2-х электродной измерительной ячейки (что допустимо при проведении сравнительных испытаний), которая применялась в настоящих исследованиях. Выбор системы электродов «шар - плоскость» был обусловлен необходимостью получения достоверного результата при малом количестве испытуемого материала.

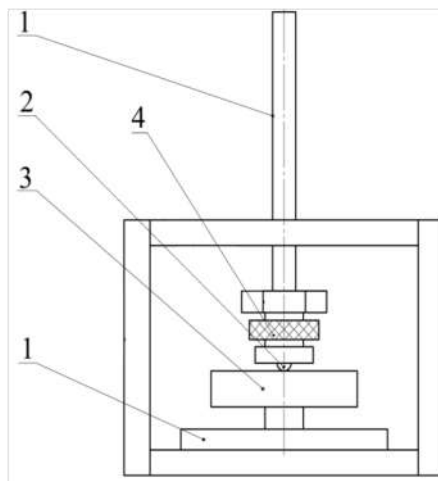


Рис. 2.2. Схема 2-х электродной измерительной ячейки для определения $U_{пр}$ электроизоляционной бумаги:
1 – места крепления подводных кабелей; 2 – верхний электрод (шар диаметром 6 мм); 3 – нижний электрод (диаметром 25 мм); 4 – груз

Перед началом испытаний латунные электроды измерительной ячейки шлифовались пастой ГОИ. Образец бумаги предварительно высушивался в термостате в течение 60-ти минут при температуре 70°C и свободной циркуляции воздуха, после чего размещался между верхним и нижним электродами. С помощью шайб (рис. 2.2. – 4), зафиксированных на подводящем стержне верхнего электрод, создавалось давление на образец, равное значению (10 ± 1) кПа, которое соответствует требованиям ГОСТ 26130-84. Расчет кратковременной электрической прочности единичного измерения $E_{пр}$ проводился согласно выражению 2.2:

$$E_{пр} = \left(\frac{U_1}{h_{ср}} \right) \cdot K_n, \quad 2.2.$$

где: U_1 [В] – напряжение, фиксируемое вольтметром в первичной цепи высоковольтного трансформатора в момент пробоя; $h_{ср}$ [мм] – средняя толщина образца; K_n – поправочный коэффициент.[38]

Средняя (из 3-х замеров) толщина образца в области пробоя определялась с помощью электронного микрометра погрешностью измерения 0,001 мм. Четкий след от пробоя без «прогаров» (рис. 2.3) свидетельствовал об отсутствии крупных проводящих частиц в опытном материале.



Рис. 2.3. Фото места пробоя: а - в случае образования «прогара» (пример); б – без образования «прогара» (при испытаниях опытных образцов ЭИБ из бамбука)

Поправочный коэффициент « $K_{п}$ » включал в себя коэффициент трансформации и коэффициент пересчета (введение которого позволяло исключить систематическую погрешность лабораторной установки). Значение поправочного коэффициента было получено при сопоставлении среднего из 30 измерений (коэффициент вариации 1,5 %) значения U_{1cp} эталонного образца промышленной электроизоляционной бумаги марки К-140, полученного при испытаниях в лабораторных условиях, со значением данной характеристики, приведенным производителем материала (ПАО «Малинская бумажная фабрика – ВАЙДМАНН» (WEIDMANN), Украина).

2.3. Определение предела механической прочности на разрыв электроизоляционной бумаги

Для определения предела механической прочности на разрыв образцов целлюлозных диэлектрических материалов использовался испытательный стенд MARK-10 ESM301 (рис. 2.4). В его комплектацию, в частности, входит цифровой динамометр Mark-10 M5-200. Регулировка процесса испытания, построение деформационной кривой, а также формирование результатов испытания в виде таблицы Excel (с последующим выводом на дисплей ПК) реализуется благодаря программному обеспечению MESURTMgauge.

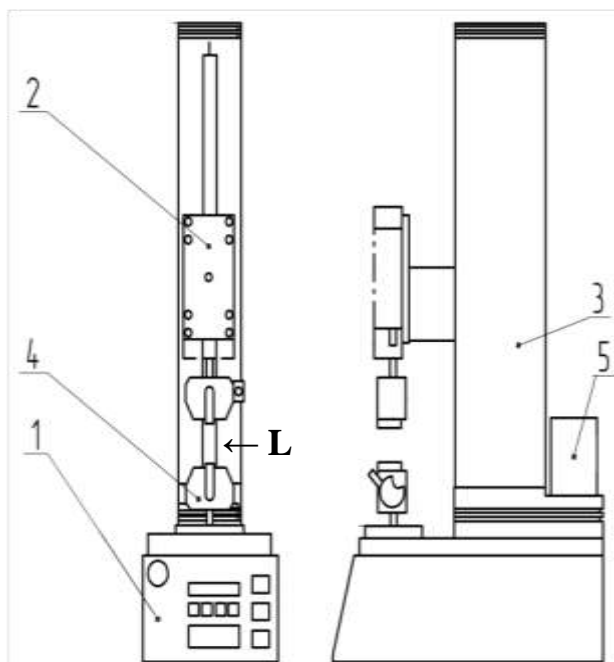


Рис. 2.4. Испытательный стенд MARK-10:

**1 – контроллер стенда; 2 – цифровой динамометр; 3 – неподвижная опора;
4 – зажимы; 5 – шаговый двигатель; L – разрывной промежуток**

Скорость растяжения образцов может варьироваться в диапазоне от 0.5 до 1100 мм/мин. В соответствии с ГОСТ 13525.1-79, размер фрагментов бумаги должен составлять (15 x 120) мм. Однако в нашем случае образцы ЭИБ были нарезаны на полосы, размером (15 x 60) мм (вследствие дефицита исследуемого материала), что является допустимым в случае проведения сравнительных испытаний.

Существенным моментом проведения испытаний (по мнению ряда специалистов) является длина разрывного промежутка – L (между зажимами - 4). Однако, мнения на этот счет весьма противоречивы. Разброс взглядов связан с отсутствием четкого представления о морфологических особенностях целлюлозы и факторах, отвечающих за прочность бумажного полотна. Поэтому нами были проведены предварительные испытания по определению разрывного усилия (F_p , Н) при различных значениях L для образцов промышленной ЭИБ (результаты которых представлены в таблице 2.1).

Таблица 2.1

Значения F_p промышленной ЭИБ при различной L

L , мм	60	10	1	0
№/№	F_p , Н			
1	258	266	285	273
2	297	280	295	282
3	289	285	274	233
4	275	264	279	230
5	254	278	278	276
среднее	275	274	282	259

Из представленных результатов следует, что изменение длины разрывного промежутка в пределах (60 - 1) мм на значение разрывного усилия практически не сказалось. Пониженное разрывное усилие при $L = 0$ мм, вполне вероятно, обусловлено механическим повреждением фрагментов бумаги при их закреплении в зажимах.

В итоге для проведения настоящих испытаний нами был выбран разрывной промежуток $L = 10$ мм, перед началом которых фрагменты исследуемых видов ЭИБ высушивались в термостате (в течение часа при температуре 70°C и свободной циркуляции воздуха).

Необходимо отметить, что, так как лабораторные отливки опытной ЭИБ из бамбука не имели четкой ориентации целлюлозных волокон в полотне материала, то, в отличие от промышленной ЭИБ, они не характеризовались анизотропией свойств. Поэтому, если нарезка фрагментов промышленной бумаги осуществлялась строго вдоль волокон (т.е. в машинном направлении), то полосы опытного материала нарезались хаотично.

В момент разрыва образца цифровой динамометр фиксировал значение разрывного усилия (F_p , Н). Толщина образца (h , мм) измерялась в месте

разрыва при помощи электронного микрометра, после чего (используя выражение 2.3) рассчитывалось значение предела механической прочности на разрыв σ_p (МПа):

$$\sigma_p = F_p / b \cdot h, \quad 2.3.$$

где: F_p – разрушающее усилие, фиксируемое в момент разрыва образца (фрагмента) ЭИБ, Н; b – ширина испытуемой полосы бумаги, мм; h – толщина ЭИБ в месте разрыва образца, мм.

Необходимо отметить, что разрыв фрагмента ЭИБ фиксировался без видимого разделения полоски бумаги на части (рис. 2.5 - а.), то есть F_p соответствует нарушению механической сцепки между целлюлозными волокнами в полотне материала, которое сопровождается только частичным разрушением отдельных волокон (рис. 2.5 – б).



Рис. 2.5. а - фото места разрыва фрагмента ЭИБ; б – микрофотография (400х) состояния целлюлозных волокон в месте разрыва (после видимого разделения фрагмента ЭИБ на части)

За величину предела механической прочности на разрыв конкретного вида ЭИБ принималось $\sigma_{p\text{ ср}}$, полученное, как среднее значение из 10 измерений на точку.

2.4. Методика проведения ускоренного термостарения опытных видов ЭИБ

Ускоренное термостарение исследуемых видов бумаги проводилось, как в сухом состоянии (с целью сравнительной оценки нагревостойкости целлюлозных материалов), так и в среде нефтяного трансформаторного масла

марки ГК (для определения сорбционной активности рассматриваемых типов ЭИБ).

В первом случае фрагменты ЭИБ помещались в термостат, где подвергались длительному термовоздействию (при температуре 140°C в условиях свободной циркуляции сухого воздуха). Допуск выбора столь высокой (для целлюлозы) температуры, рабочая температура которой составляет (70-80)° С, обусловлен тем фактом, что, согласно [39], увеличение воздействующей температуры приводит к росту скорости термоокислительной деструкции, не меняя её механизма. В процессе старения проводился отбор проб бумаги (по 10 фрагментов на точку) и определение их предела прочности на разрыв.

Во втором случае подготавливались бумажно-пропитанные композиции: одинаковые навески ЭИБ нарезались на мелкие фрагменты, помещались в стеклянные бюксы и заливались равными объемами трансформаторного масла. В каждую бюксу вводился фрагмент (длиной 120 мм, диаметром 2,3 мм) медного проводника, который использовался в качестве катализатора процесса деструкции, после чего бюксы закрывались завинчивающимися крышками. Подготовленные указанным образом композиции помещались в термостат (рис. 2.6. – а) вместе с контрольным образцом – маслом с медным катализатором без бумаги (рис. 2.6. – б).



Рис. 2.6. а - термостат с бюксами; б – контрольный образец масла ГК с медным катализатором (спираль медного проводника) без бумаги

Подготовленные указанным образом бумажно-пропитанные композиции были подвергнуты длительному термостарению при температуре 140°C в герметично закрытых бюксах. Выбранный температурный режим был основан на результатах предварительных исследований сорбционной активности ЭИБ (проводимых на кафедре «ЭИКК» СПбПУ), а также – на публикациях отечественных и зарубежных авторов [40-43].

2.5. Методика оценки сорбционной способности ЭИБ на основе определения коэффициента относительного светопропускания жидкости

Методика основана на том факте, что свет, который проходит сквозь кювету с изучаемым образцом жидкости, более активно рассеивается при наличии механических частиц (в частности – фрагментов шлама), чем в случае их отсутствия. Чем больше механических примесей в жидкости, тем ниже значение её коэффициента относительного светопропускания – K_{oc} , %.

В процессе термостарения бумажно-пропитанных композиций производился отбор проб жидкости, для которых (при помощи микроколориметра МКМФ-1) измерялся K_{oc} . На рис. 2.7. представлена оптическая схема микроколориметра.

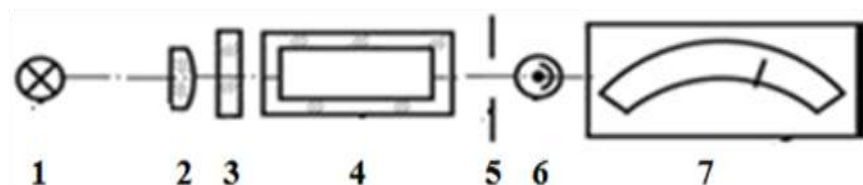


Рис. 2.7. Упрощенная оптическая схема микроколориметра МКМФ-1:
 1 – лампа накаливания; 2 – конденсорная линза; 3 – сменяемый светофильтр;
 4 – кювета с образцом; 5 – диафрагма (щель); 6 – фотоэлемент; 7 – гальванометр

Указанный оптический прибор позволяет (за счет смены светофильтров) проводить оценку светопропускания на шести длинах волн: (425, 458, 515, 540, 578, 610) нм. В нашем случае использовался синий фильтр (длина волны 458 нм). K_{oc458} определялся по отношению к эталону (глицерину), светопропускание которого было принято за 100 %.

Жидкость заливалась в кювету микроколориметра (рис. 2.8), после чего проводилось определение её светопропускания. Затем проба возвращалась в соответствующую бюксу и старение продолжалось.



Рис. 2.8. Кювета с пробой жидкости, которая старилась в стеклянной бюксе в контакте с бумагой и медным катализатором

Сопоставление значений коэффициента относительного светопропускания жидких сред, измеренного на одной и той же длине волны, позволяет дать заключение о сорбционной активности образцов ЭИБ. Чем больше значение K_{oc} , тем меньше загрязнений в пробе, а, значит, тем эффективнее бумага чистит масло, замедляя старение компонентов композиции.

2.6. Анализ состояния диэлектрических материалов с применением увеличительной техники

Помимо определения коэффициента относительного светопропускания, который является косвенной характеристикой степени чистоты жидкого диэлектрика, нами дополнительно применялась увеличительная техника для визуальной оценки состояния жидкости (подтверждающей или опровергающей сорбционную активность бумаги) и морфологических особенностей образцов ЭИБ. Так при исследовании шламообразования в масле использовался микроскоп Analit (позволяющий получать увеличение исследуемого объекта в 150, 400 и 900 раз) в сочетании с цифровой телевизионной камерой «Celestron» (Digital microscope image – Германия) в сопряжении с ПК (рис. 2.9).

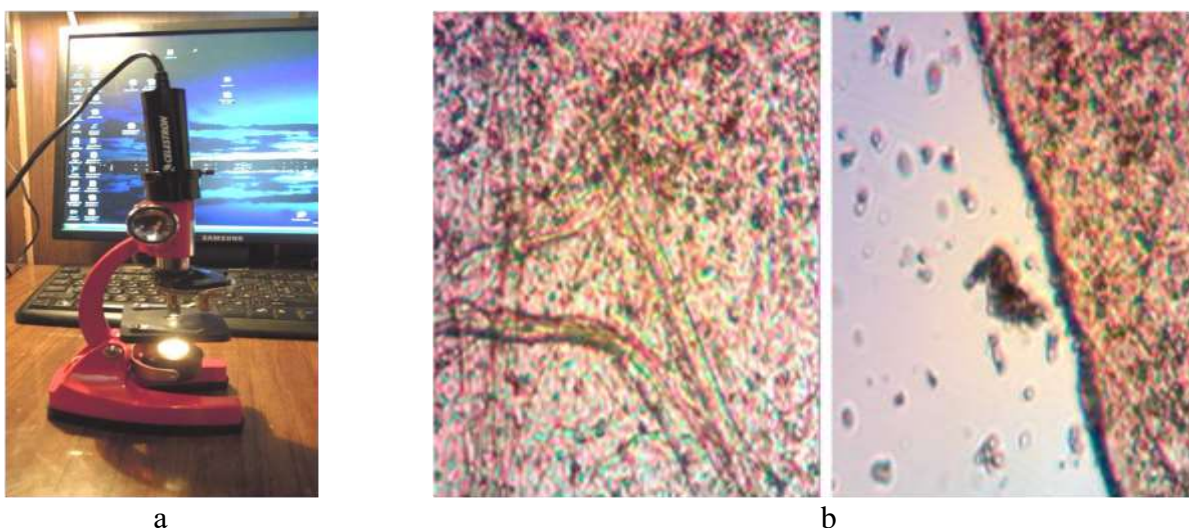


Рис. 2.9. а - микроскоп «Analyt» с камерой «Celestron» (Digital microscope image); б – пример микрофотографии фрагмента бумаги и масла с частицами шлама (400х), полученные с применением указанной оптической техники

Для детального (визуального) изучения морфологических особенностей образцов электроизоляционной бумаги применялся сканирующий электронный микроскоп (SEM) SUPRA-55VP-25-78 (Zeiss) с увеличением до 131000 раз (131 Кх). В результате был получен ряд микроснимков, которые позволили проиллюстрировать и дополнить сведения о жидких и целлюлозных образцах, полученные иными способами.

2.7. Оценка состава по волокну электроизоляционной бумаги

ЭИБ изготавливают из волокон электроизоляционной целлюлозы, структура и характеристики которой во многом зависят от источника сырья и, в свою очередь, существенно влияют на электрофизические, механические, химические свойства диэлектрика, а также – его нагревостойкость и сорбционную активность. Поэтому при производстве электроизоляционной бумаги одним из наиболее важных контролируемых параметров является степень однородности и качество волокна, что предопределило проведение анализа по волокну, который представлен в настоящей работе. Исследование проводилось с использованием специализированного анализатора «Fiber Tester» (рис. 2.10). Устройство было подключено к ПК, с помощью которого происходило управление испытанием, сбор данных и формирование отчета. В отчете присутствуют такие параметры, как: средние значения длины и ширины волокон с их распределением по длине и ширине соответственно; изломы и другие характеристики (рис. 2.11).

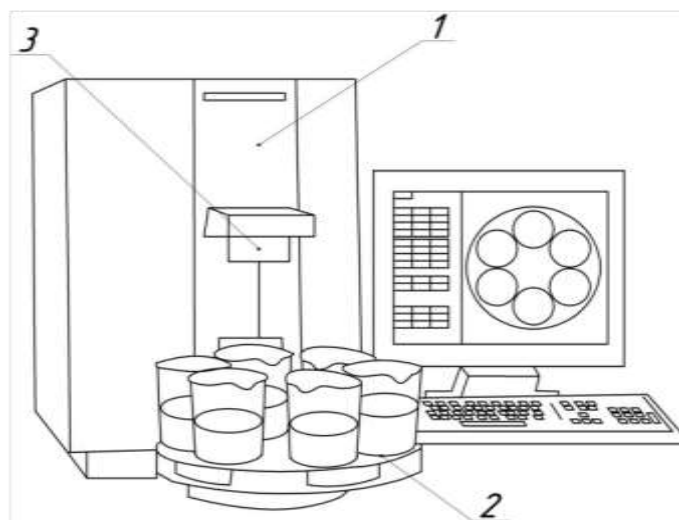


Рис. 2.10. Схематическое изображение анализатора волокон Fiber Tester:
1 – индикатор текущей операции последовательности измерения; 2 – вращающийся столик с шестью стаканами для проб; 3 – пробоотборник с трубкой



Рис. 2.11. Монитор ПК, сопряженного с анализатором волокон Fiber Tester, на экране которого формируется отчет о характеристиках волокон образца ЭИБ

Предварительная стадия испытания образцов бумаги состоит в дезинтегрировании проб ЭИБ (0,1 г) при температуре (30-40)°С в водной среде. Полученные суспензии, объемом по (100-200) мл, помещают в стаканы для проб (позиция 2), расположенные на вращающемся столике прибора. Таким образом, анализатор одновременно проводит тестирование 6-ти образцов целлюлозного материала, формируя отчет по каждому.

Глава 3. Экспериментальная часть

3.1. Объект исследования

Настоящее исследование проводилось в соответствии с международным договором №772 от 24.09.2017 между СПбПУ и университетом Бинь Зыонг (Социалистическая республика Вьетнам) с целью изучения возможности получения электроизоляционной бумаги (ЭИБ) из национального сырья Ю-В Азии. Однако результаты работы представляют научно - практический интерес и для российских производителей электротехнических материалов вследствие расширения представлений о влиянии особенностей целлюлозного волокна на основные электрофизические характеристики и нагревостойкость высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции (БПИ). Конечной целью проводимых исследований является разработка рекомендаций по выбору исходных характеристик электроизоляционной целлюлозы (ЭИЦ) для повышения работоспособности высоковольтных электротехнических объектов, в частности – силовых трансформаторов.

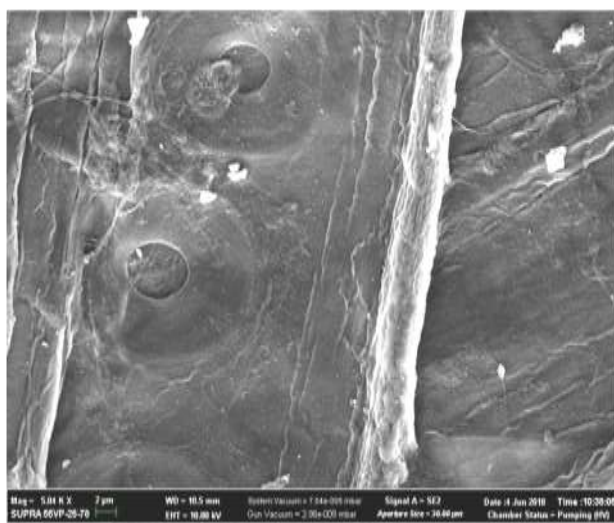
3.1.1. Выбор исходного сырья для получения опытных образцов ЭИБ

Как показано в Главе 1, предварительные исследования, проведенные в СПбПУ [2, 8, 16, 23, 30, 32, 33], выявили преимущества волокна бамбука над джутом и особенно – волокном кокоса, которое проявилось в более высоких значениях электрической и механической прочности, а также – нагревостойкости и сорбционной активности промышленной ЭИБ (полученной из Бенгальской национальной электротехнической компании Народной республики Бангладеш) из указанных видов сырья. Поэтому именно бамбук был выбран в качестве исходного материала для получения опытных образцов целлюлозного диэлектрика.

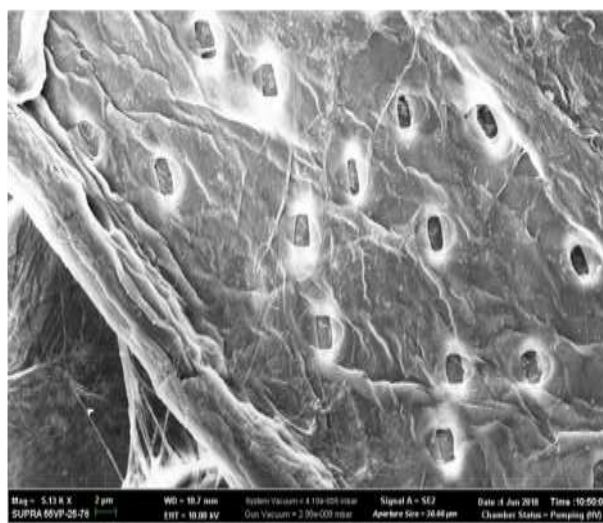
Рассматривались отливки ЭИБ, изготовленные из стеблей бамбука (Вьетнам) без учета его сорта. Для этого в лабораторных условиях СПбГЛТУ (ЛТА им. С.М. Кирова) была подготовлена электроизоляционная целлюлоза (ЭИЦ). Специалисты из ИВС РАН и Лесотехнического университета разбили

стебли на щепу и, в результате последующей кислотно-щелочной обработки, получили две партии ЭИЦ (VI и VII) по технологии, так называемой, «сульфатной варки» сосны (применяемой в России). Использование данной технологии обусловлено отсутствием сведений о методах переработки бамбука вследствие того факта, что Вьетнам закупает ЭИБ за рубежом.

Упомянутое преимущество бамбука над иными источниками целлюлозы из сырья Юго-Восточной Азии гипотетически связали, в том числе, с особенностями морфологии волокон – в частности, с характеристиками сосудов, которые представляют собой своеобразные трубки различной длины и ширины. На рис. 3.1. [44] отчетливо видны поперечные сечения указанных образований в целлюлозе бамбука и кокоса, отличающиеся количеством и формой.



Бамбук: 5.04 Kx



Кокос: 5.13 Kx

Рис. 3.1. SEM-кадры волокон бамбука и кокоса [44]

Проведенное нами сравнительное визуальное изучение (при помощи сканирующего электронного микроскопа - SEM) структуры волокон бамбука (VB) и отечественной сосны (VS), также, продемонстрировало их морфологические различия. На рис. 3.2 (1 – 3) представлена выборка полученных SEM-кадров близкой степени увеличения. Видно, что волокна древовидного злака – травы «бамбук» имеют отверстия (рис. 3.2-2 и 3.2-3),

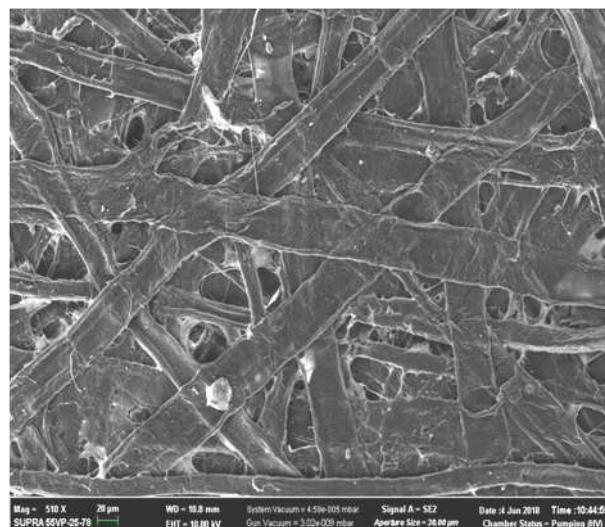
которые представляют собой поперечные срезы крупных сосудов, в то время как у волокон сосны их нет (что совпадает со сведениями об отсутствии данных структурных элементов у хвойных пород деревьев в отличие от лиственных).

Сосна (VS):



1. Увеличение: 508 x

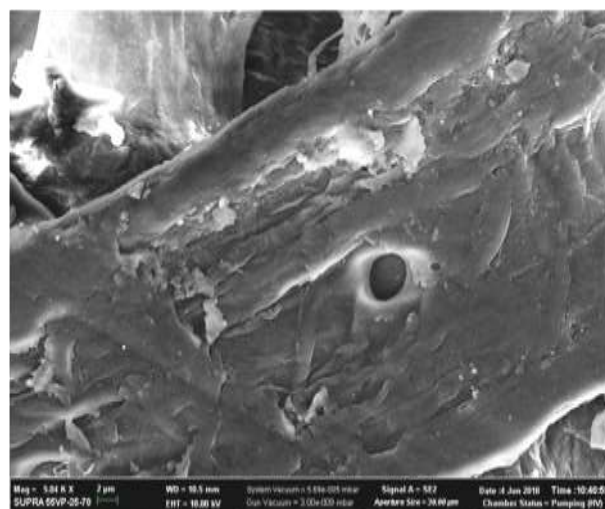
Бамбук (VB):



509 x

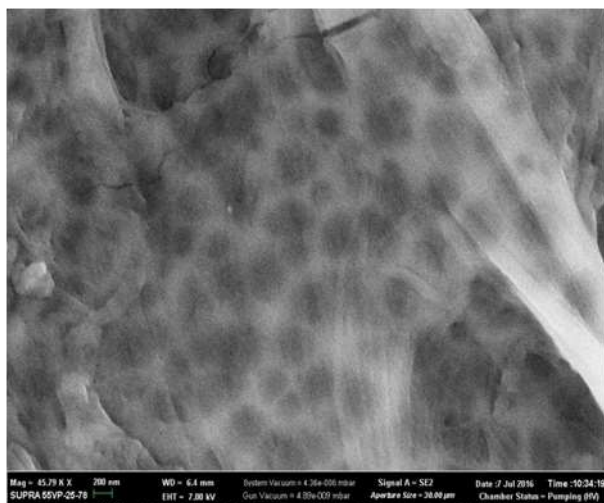


1. Увеличение: 5,01 Kx

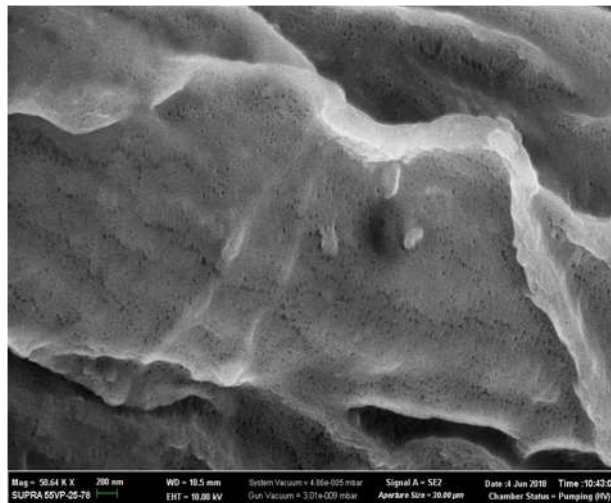


5,01 Kx

Рис. 3.2. SEM-кадры (1-3), иллюстрирующие морфологические особенности фрагментов ЭИБ из растительных волокон сосны и бамбука

Сосна (VS):

1. Увеличение: 508 х

Бамбук (VB):

509 х

Рис. 3.2. (продолжение) SEM-кадры (1-3), иллюстрирующие морфологические особенности фрагментов ЭИБ из растительных волокон сосны и бамбука

Кроме того, отчетливо видно, что целлюлозная сетка VS более крупная по сравнению с аналогичными морфологическими элементами VB (рис. 3.1 – 3), хотя увеличение кадра волокна бамбука больше.

Указанные особенности во многом определяют индивидуальные характеристики целлюлозных материалов из разного сырья. Поэтому при его выборе для изготовления опытных образцов ЭИБ первоначально (при помощи Fiber-Tester) было проведено исследование волокон бамбука VI и VII на разных стадиях изготовления ЭИЦ: после варки и после размола в ролле Валлея, включая анализ параметров сосудов (рис. 3.3. – 1 - 6).

ЭИЦ бамбука, партия I - VI



Рис. 3.3 – 1. VI - сосуды после варки

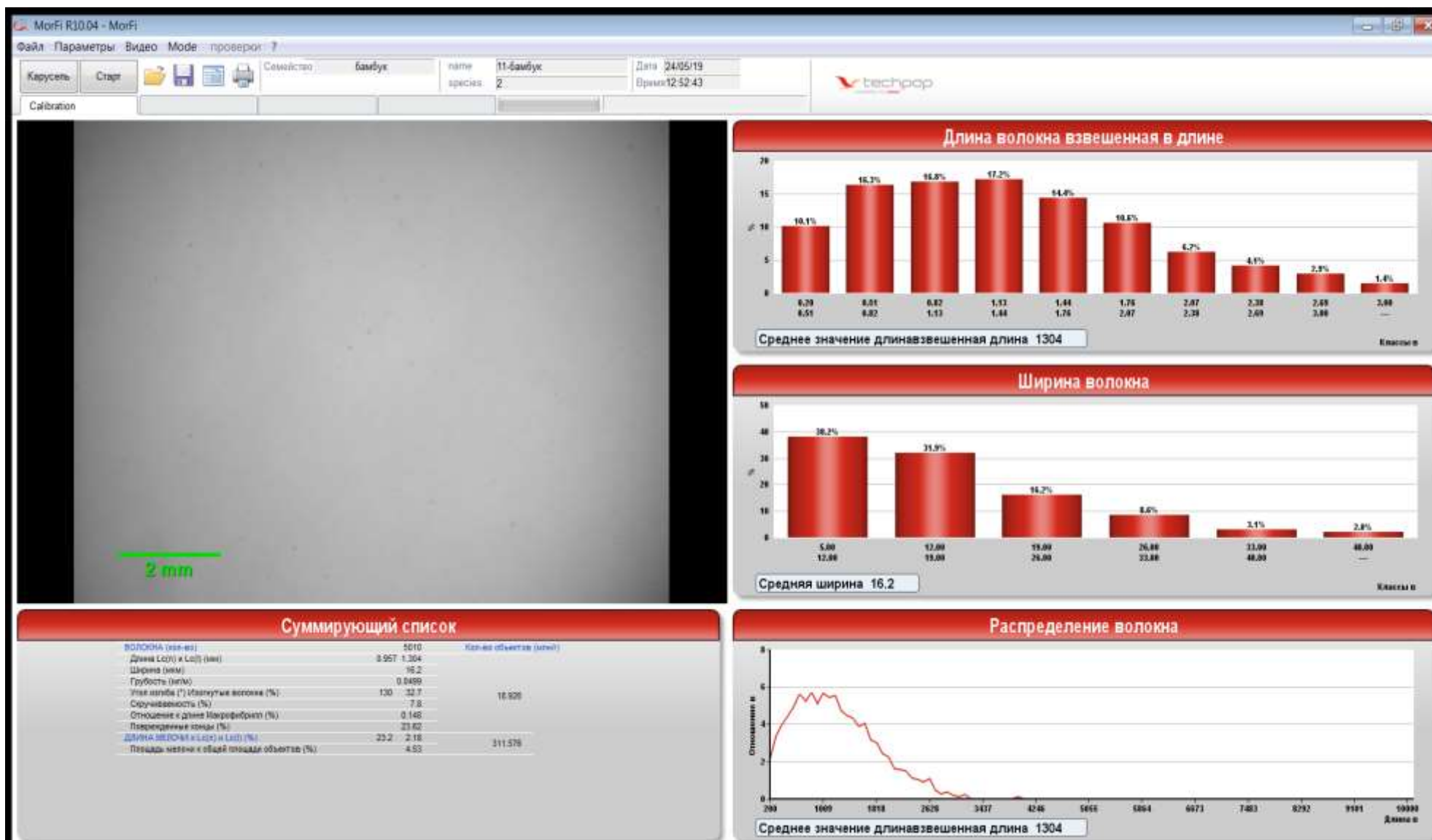


Рис. 3.3 – 2. VI – волокна после варки



Рис. 3.3 - 2 (продолжение). VI – волокна после варки

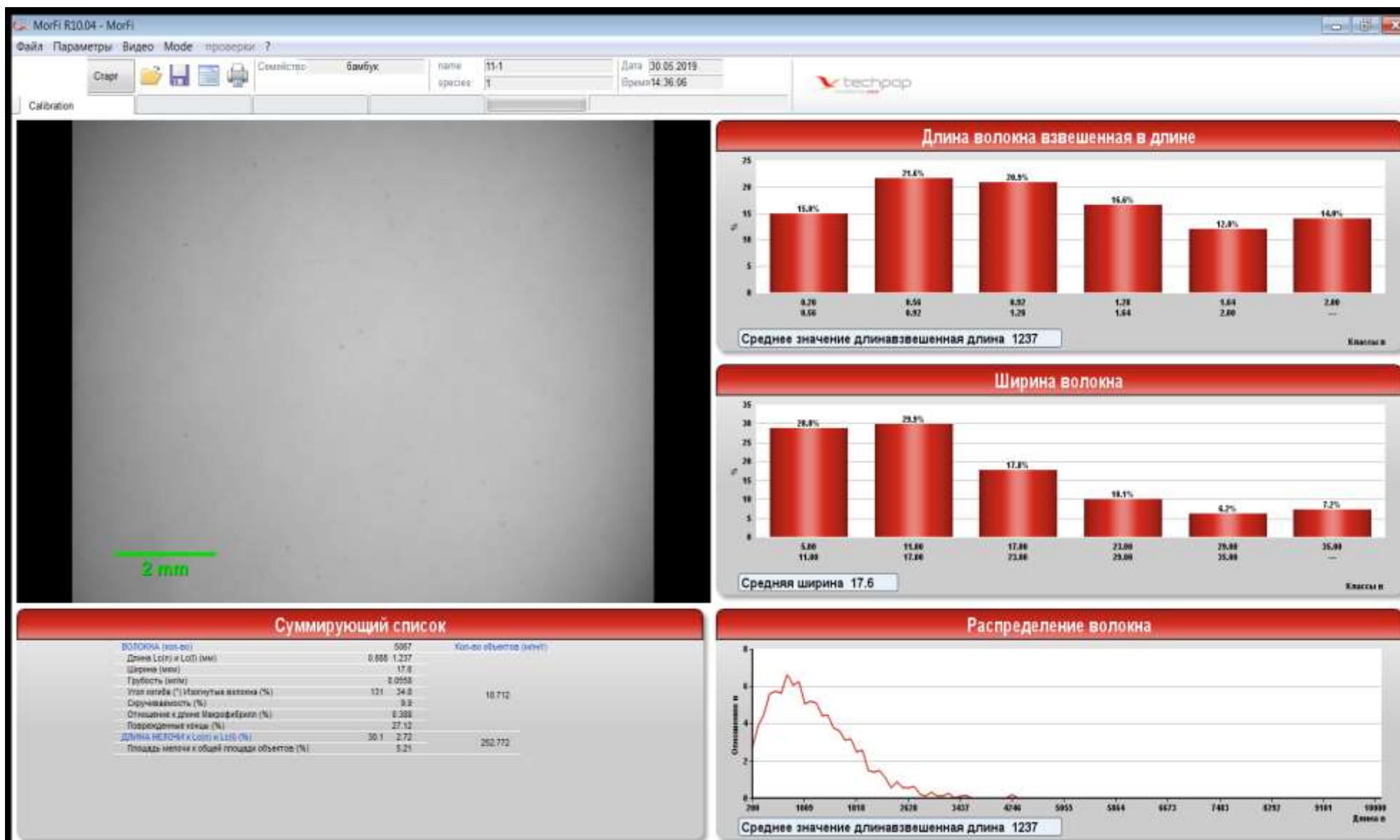


Рис. 3.3 – 3. VI – волокна после размола



Рис. 3.3 – 3 (продолжение). VI – волокна после размола

ЭИЦ бамбука, партия II – ВП

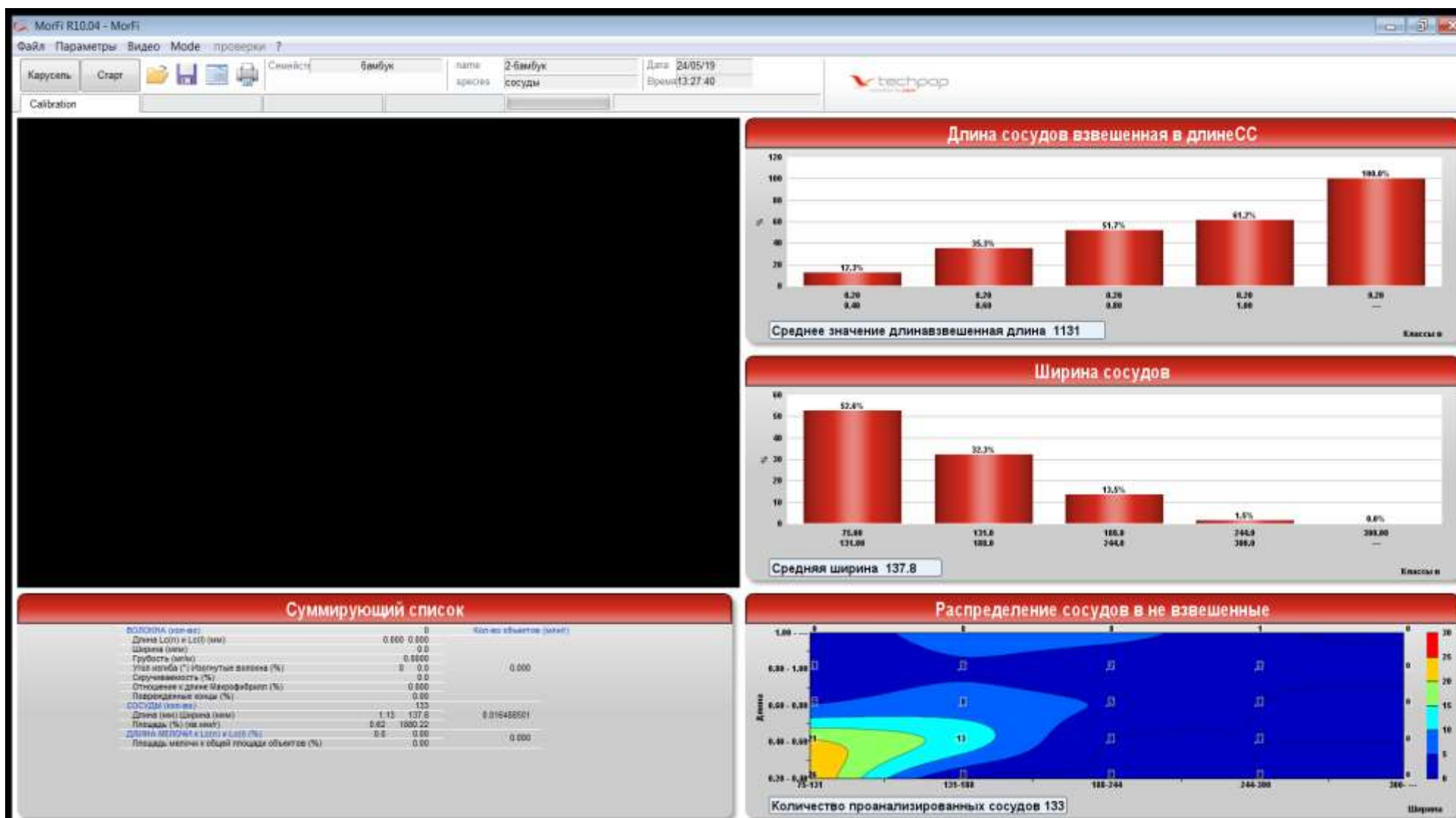


Рис. 3.3 – 4. ВП - сосуды после варки

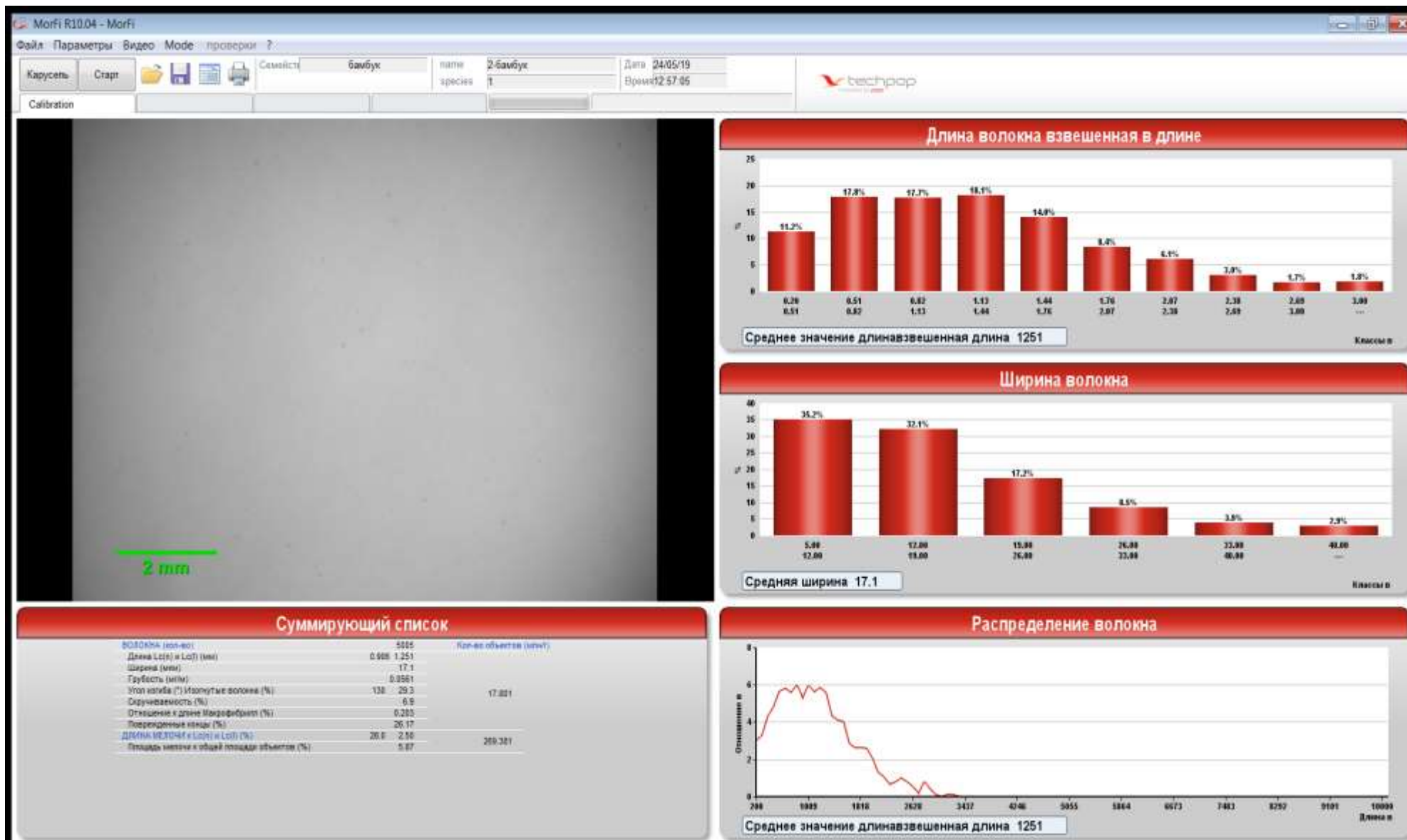


Рис. 3.3 - 5. ВП – волокна после варки



Рис. 3.3 – 5 (продолжение). ВП – волокна после варки

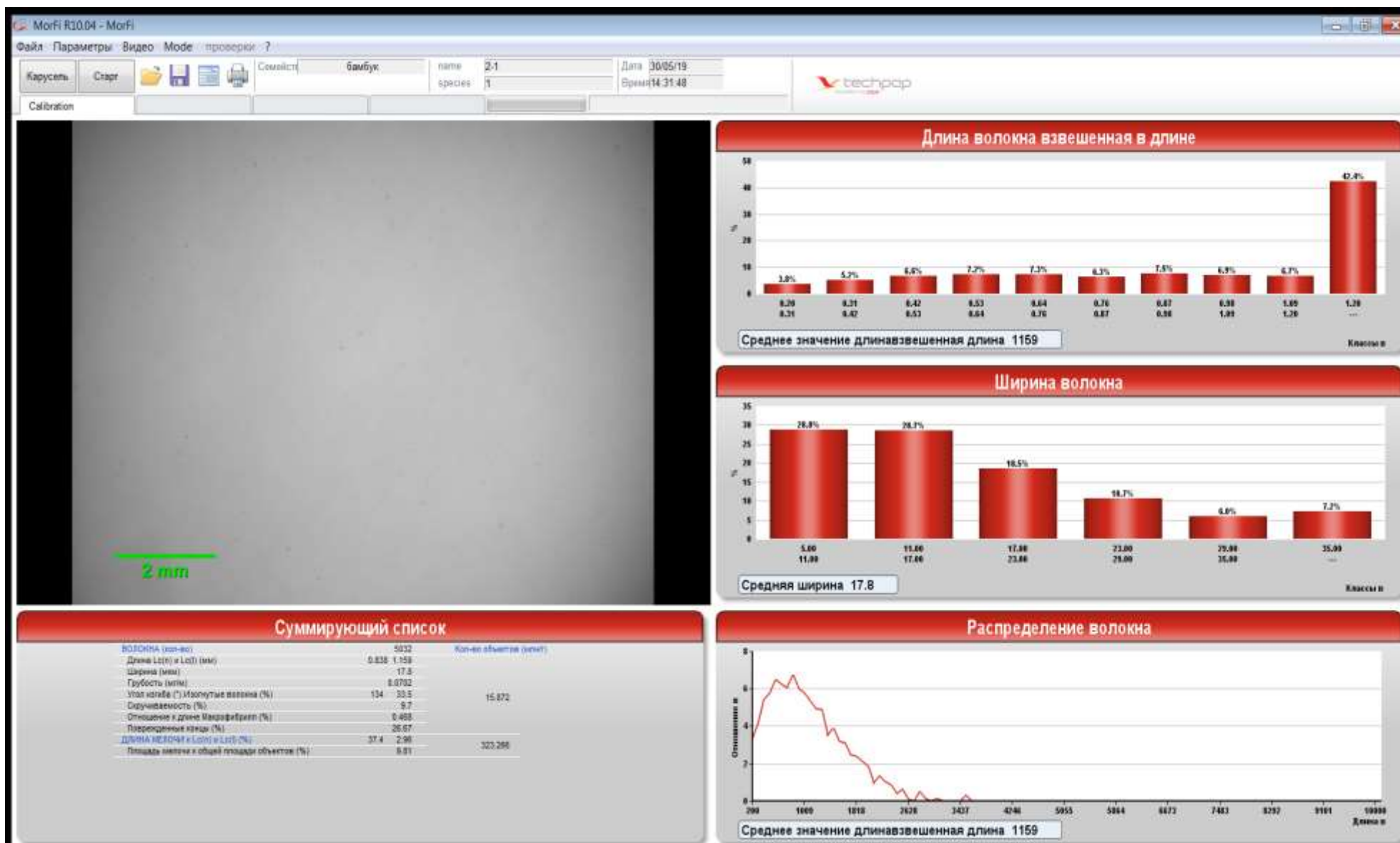


Рис. 3.3 - 6. ВП – волокна после размола



Рис. 3.3 – 6 (продолжение). ВП – волокна после размола

Если обратить внимание на суммирующие параметры сосудов в обеих партиях целлюлозы (рис. 3.3. – 1 и рис. 3.3. – 4), то они существенно различаются (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Результаты исследования сосудов партий ЭИЦ из бамбука VI и VII

Характеристика сосудов	VI	VII
Количество	74	133
Площадь, %	0,24	0,62
Средняя длина, мм	0,64	1,13
Средняя ширина, мкм	132,7	137,8

Анализ двух равных навесок ЭИЦ обеих партий выявил, что волокна VII имеют практически в 2 раза больше сосудов, площадь которых и длина существенно превышают аналогичные показатели VI. Было правомерно предположить, что бумага из VII может иметь более низкие характеристики, чем бумага VI. Поэтому, после изготовления отливок ЭИБ из волокон бамбука обоих вариантов первоначально были определены основные электрофизические характеристики обоих вариантов целлюлозного диэлектрика с целью выбора более качественного опытного материала.

3.1.2. Исходные характеристики отливок ЭИБ из волокна бамбука партий VI и VII

Были изготовлены опытные однослойные отливки целлюлозной бумаги на основе волокна бамбука, в состав которых экспериментально вводилась бактериальная целлюлоза с целью повышение электрофизических характеристик разрабатываемого диэлектрического материала. Для этого целлюлоза бамбука размалывалась при помощи Центробежного размалывающего аппарата, а бактериальный компонент (БЦ СКР, синтезированный штаммом бактерий - *Komagataeibacter rhaeticus*, номер В - 13015 во

Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов) измельчался в ИВС РАН при помощи промышленного дезинтегратора JTC Omni Blend I, модель TM-767. Далее оценивались средние значения кратковременной электрической прочности ($E_{пр\ ср}$ – по 20 пробоев на точку), а также – предела механической прочности на разрыв ($\sigma_{разр\ ср}$ – по двадцать фрагментов на точку) опытных отливок ЭИБ (№1 - №5) - таблица 3.2.

Таблица 3.2

Исходные характеристики однослойных отливок ЭИБ из ЭИЦ бамбука партий VI и VII

Номер образца ЭИБ	Состав отливок ЭИБ	$E_{пр\ ср}$, кВ/мм	$\sigma_{разр\ ср}$, МПа
Отливки ЭИБ из ЭИЦ бамбука партии VII			
№1	100% бамбук (ЦБ)	10.6	41.3
№2	97.5% ЦБ + 2.5% БЦ	11.2	37.5
№3	95.0% ЦБ + 5.0% БЦ	12.4	43.2
Отливки ЭИБ из ЭИЦ бамбука партии VI			
№4	100% бамбук (ЦБ)	7.2	30.4
№5	95.0% ЦБ + 5.0% БЦ	10.2	31.0

Как видно из представленных результатов, введение БЦ в состав бумаги (образцы № 2 и 5) прогнозируемо способствовало повышению её прочности ($E_{пр}$ и $\sigma_{разр\ ср}$) по сравнению с вариантами без биодобавки (образцы №№ 1 и 4). Действительно, как показано в наших более ранних исследованиях [8, 30], бактериальная целлюлоза структурирует полотно ЭИБ из растительной целлюлозы, обеспечивая совершенствование основных свойств диэлектрического материала.

Неожиданным оказался тот факт, что характеристики контрольных образцов электроизоляционной бумаги из 100% VII оказались существенно выше, чем из VI (таблица 3.2, образцы №1 и №4, соответственно), несмотря на повышенное содержание сосудов. Данное явление можно объяснить тем

фактом, что степень помола волокон ВП составила 53°ШР, а ВІ - 37°ШР (размол проводился в одинаковых условиях в течение одинакового времени). В результате в первом случае в полотне бумаги оказалось меньше воздушных включений, поэтому выше электрическая и механическая прочность. Кроме того, анализ результатов оценки характеристик волокон после размола (рис. 3.4.) показал, что у партии ВП (по сравнению с ВІ) преобладает доля наиболее длинных волокон (42%), обеспечивающих механическую сцепку в материале, что способствует повышению прочности ЭИБ. Поэтому для дальнейших испытаний были выбраны образцы опытной электроизоляционной бумаги из волокон бамбука партии ВП (однослойные, некаландрированные, с хаотичным распределением волокон по полотну материала) следующего состава (которые и явились **объектом настоящего исследования**):

монобумага

№0 - 100% ЭИЦ сосны – контрольный образец

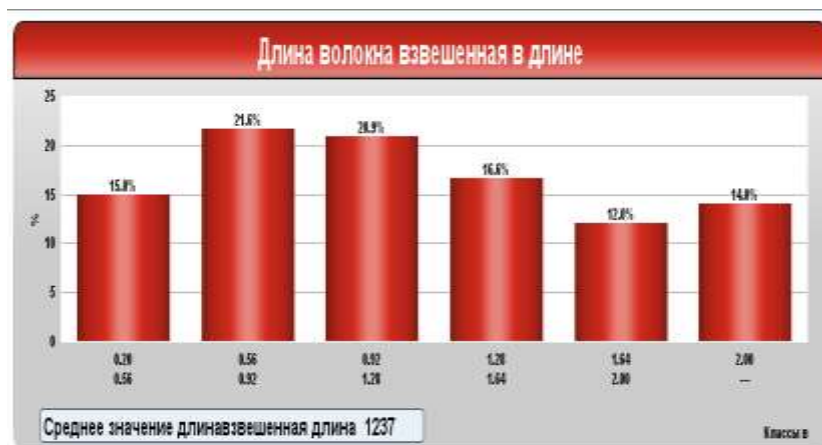
№1 - 100% ЭИЦ бамбука ВП

композит

№2 - 97,5% ЭИЦ бамбука ВП + 2,5% БЦ СКР

№3 - 95,0% ЭИЦ бамбука ВП + 5,0% БЦ СКР

Для указанных вариантов ЭИБ оценивалась нагревостойкость (на основании динамики предела механической прочности на разрыв в процессе термостарения в сухом состоянии) и сорбционная активность по отношению к нефтяному трансформаторному маслу марки ГК Ангарского нефтеперерабатывающего завода.



1.



2.

Рис. 3.4. Характеристики волокон бамбука VI (1) и VII (2) после размола

3.2. Исследование нагревостойкости опытной ЭИБ из бамбука

Как отмечалось, одной из наиболее важных причин отказа силовых трансформаторов (СТ) является старение бумажно-пропитанной изоляции (БПИ). Поэтому ресурс БПИ, а во многом и трансформатора в целом, определяется старением электроизоляционной бумаги. Во время эксплуатации ЭИБ практически сохраняет неизменными диэлектрические характеристики, но теряет механическую прочность вследствие химических и структурных превращениях целлюлозной основы материала. Поэтому исследование нагревостойкости ЭИБ путем анализа динамики её механических свойств в процессе термостарения является одним из важнейших этапов разработки любого целлюлозного диэлектрика.

При проведении указанных испытаний опытной бумаги из бамбука в качестве контрольного образца была выбрана ЭИБ из целлюлозы сосны сульфатной варки, используемой для производства отечественного высоковольтного диэлектрика. Первоначально было проведено повторное определение электрической и механической прочности указанных образцов в исходном состоянии (выборка составила по 30 замеров на точку).

Таблица 3.3

Значения кратковременной электрической прочности и предела механической прочности на разрыв объекта исследования в исходном состоянии

Номер образца ЭИБ	Состав отливок ЭИБ	$E_{пр\ ср}$, кВ/мм	$K_{вар}$, %	$\sigma_{разр\ ср}$, МПа
№0	100% ЭИЦ сосны	6,1	2,7	15,7
№1	100% ЭИЦ ВП	11,2	4,3	42,8
№2	97.5% ЭИЦ ВП + 2.5% БЦ СКР	11.8	4,0	40,3
№3	95.0% ЭИЦ ВП + 5.0% БЦ СКР	13.1	4,7	43,5

В результате испытаний установлено, что $E_{пр}$ опытных однослойных отливок ЭИБ из бамбука в среднем, как минимум, в 1,8 раза выше, чем у

аналогичной отливки из волокон сосны и даже в 1,2 раза - по сравнению с $E_{пр}$ трехслойной каландрированной электроизоляционной бумагой промышленного изготовления марки К-140.

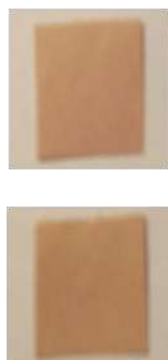


Рис. 3.5. Фото линии отрыва фрагмента отливки ЭИБ из ВП (пример)

Испытания на разрыв показали, что разделение на части фрагментов ЭИБ происходит в плоскости максимальных нормальных напряжений (рис. 3.5). Т.е. можно предположить,

что распределение БЦ по полотну отливки из растительной целлюлозы было достаточно равномерным.

Коэффициент вариации во всех случаях не превышал 8 %. Средние значения предела механической

прочности на разрыв отливок из бамбука (№1 - №3) оказались в 2,7 раза выше, чем отливки из сосны, но в 2 раза ниже промышленной бумаги, вследствие её исполнения в 3-хслойном варианте и ориентации волокон в направлении движения бумажного полотна.

Далее проводилось термостарение (при температуре 140°C и свободном доступе воздуха), в процессе которого отбирались фрагменты ЭИБ (по 10 полос на точку) и определялась их механическая прочность. Измерения значений $E_{пр}$ не проводилось, т.к., как известно, электрическая прочность целлюлозной бумаги в ходе старения практически не меняется [4]. На основе полученных результатов построены зависимости $\sigma_{разр\ ср} = f(\tau)$, представленные на рис. 3.6.

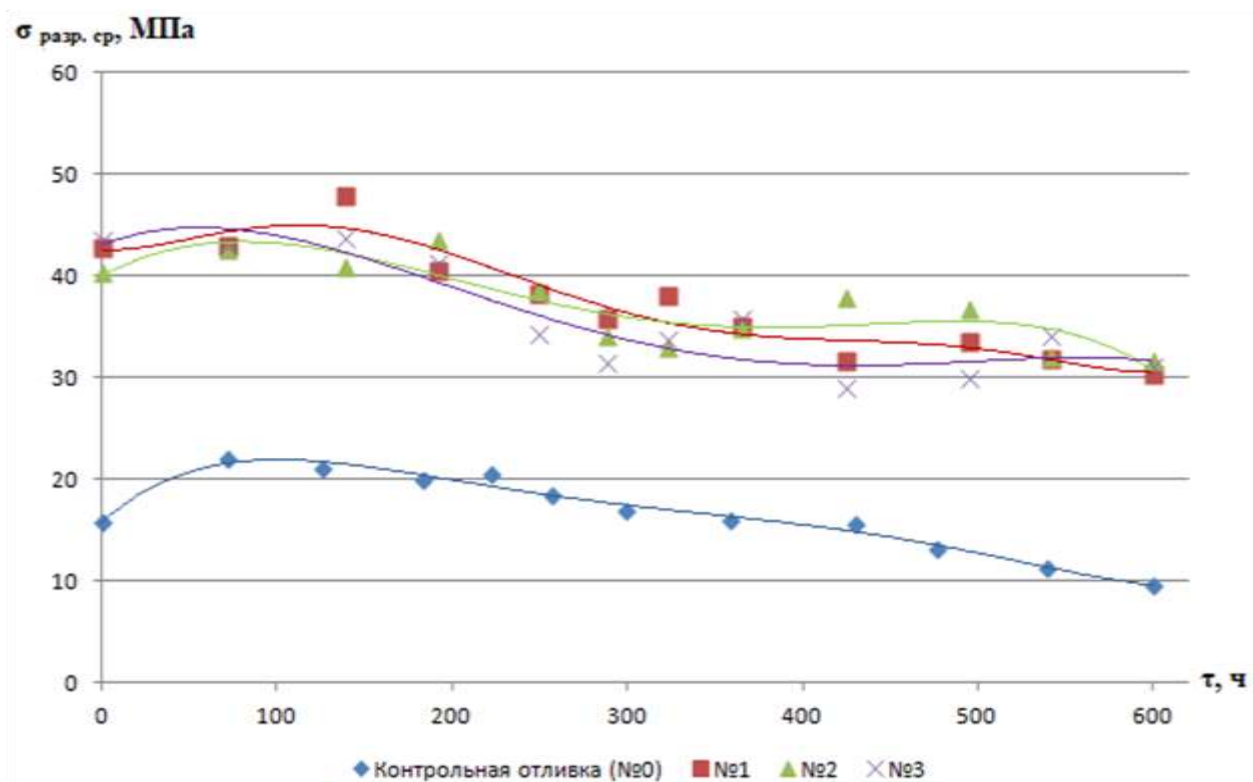


Рис. 3.6 График зависимости $\sigma_{\text{разр ср}} = f(\tau)$

Испытания показали, что за период исследований снижение прочности образцов из ВП было существенно меньшим, чем из сосны (табл. 3.4), т.е. отливки ЭИБ из бамбука отличались повышенной нагревостойкостью по сравнению с бумагой из традиционно используемого растительного сырья.

Таблица 3.4

Снижение механической прочности образцов за время испытаний ($\tau = 600$ часов)

Образец ЭИБ	№0	№1	№2	№3
Снижение $\sigma_{\text{разр ср}}$, %	38	29	22	29

Сведения, представленные в табл. 3.4, получены путем сопоставления исходных и конечных значений $\sigma_{\text{разр ср}}$ отливок ЭИБ. Однако, как видно из рис. 3.6. (кривая 1), для образца №0 на начальном участке испытаний наблюдался рост характеристики, связанный с образованием дополнительных водородных связей (по мере удаления воды), повышающих прочность материала. Данный

факт хорошо известен применительно к целлюлозной бумаге из сосны. Так ход кривой близок к результатам, полученным при испытаниях однослойных отливок ЭИБ из сосны, приведенных в других исследованиях. В частности, на рис. 3.7. показан фрагмент иллюстрации динамики предела механической прочности на разрыв подобного образца (синяя кривая), представленной в работе [45].

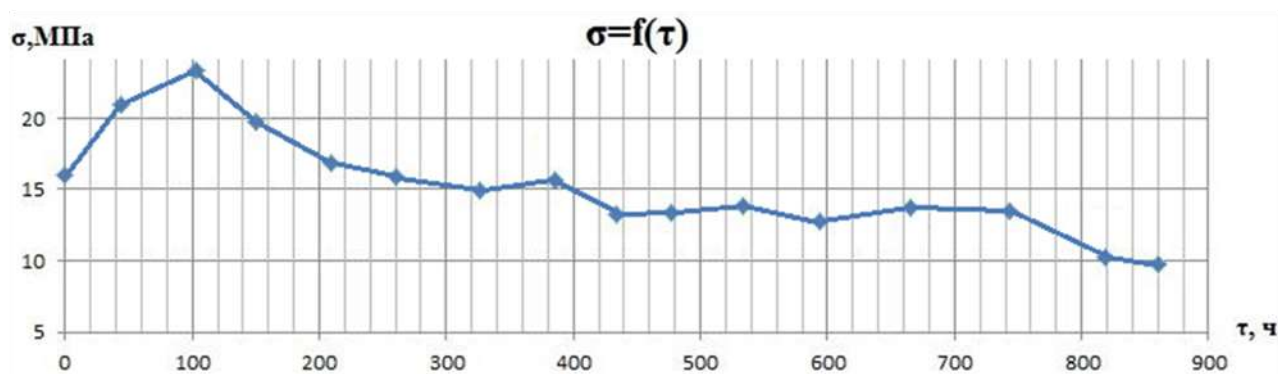


Рис. 3.7. Зависимости изменения предела механической прочности на разрыв однослойной отливки из целлюлозы сосны от времени термостарения при 140°C

Если учитывать максимальное значение предела прочности образца №0 (22,0 МПа), то снижение прочности составит 56%, т.е. практически в 2 раза больше, чем у образцов из бамбука (№1 - №3).

Кроме того, в работе [1] показано, что промышленная (каландрированная, трехслойная) ЭИБ марки К-140 при аналогичных испытаниях потеряла 50% механической прочности уже за 400 часов старения, т.е. и она уступает опытной ЭИБ из бамбука по данному показателю.

Следует отметить, что влияния БЦ на устойчивость к длительному термовоздействию исследуемой опытной бумаги (в отличие от её положительного воздействия на $E_{пр}$ указанного материала) нами не выявлено. Данный результат требует дополнительной проверки, так как противоречит ранее полученным сведениям о свойствах композитов из растительной и бактериальной целлюлозы [12]. Можно предположить, что указанное явление связано с отсутствием отработанной технологии смешивания данных волокон.

3.3. Оценка сорбционной способности ЭИБ из бамбука

Природная сорбционная способность целлюлозы, обеспечивающая замедление процессов деструкции компонентов БПИ, является той критериальной характеристикой, которая, по нашему мнению, должна в обязательном порядке анализироваться при разработке новых видов ЭИБ из природных волокон. Поэтому было проведено термостарение (при температуре 140°C) образцов бумаги (№0 - №3) в среде нефтяного трансформаторного масла марки ГК в контакте с медным катализатором деструкции (спираль медного проводника – в дальнейшем Cu). Параллельно, в аналогичных условиях, старилась контрольная проба – масло с катализатором без бумаги.

В ходе испытаний изымались пробы жидкости, для которых определялось светопропускание, а также проводилось визуальное изучение их состояния при помощи увеличительной техники, после чего масло возвращалось в соответствующие бюксы и старение продолжалось. Оценка сорбционной активности ЭИБ проводилась на основе сопоставления значений коэффициента относительного светопропускания жидкого диэлектрика, измеренного на длине волны 658 нм ($K_{oc\ 658, \%}$) при помощи микроколориметра МКМФ-1 (таблица 3, средние значения по 3-м измерениям на точку).

Таблица 3.5

Средние значения коэффициента относительного светопропускания масла ГК

τ, ч	0	169	188	228.5	270	301	330	358	400
$K_{oc\ 658, \%}$ контрольной пробы (КП) масла ГК при старении в контакте с Cu без ЭИБ									
КП	100	2.0	0.5	0	0.5	0	0	0	0.1
$K_{oc\ 658, \%}$ проб масла ГК при старении в контакте с Cu и образцами ЭИБ:									
№0	100	17.5	13.0	6.5	2.0	0	6.0	2.2	0
№1	100	20.5	16.5	11.0	4.5	2.0	0.5	12.5	8.0
№2	100	17.5	14.5	9.0	4.5	2.0	0.5	12.5	7.0
№3	100	43.5	37.5	28.5	14.5	10.0	8.0	5.5	4.0

Видно, что светопропускание контрольной пробы (масло с медью без бумаги) через 228 ч старения упало до 0%, после чего на зависимости $K_{oc\ 658} = f(\tau)$ для данной пробы жидкости фиксировались биения. Указанные «всплески» светопропускания для проб масла, состаренных с бумагой, имели место позднее: с образцом №0 - после 300 ч старения, с образцами №1 и №2 – после 330 ч. Наши предварительные исследования, результаты которых представлены в публикациях [8, 16], позволяют объяснить данное явление постепенным накоплением в жидкости продуктов старения. В этом случае происходит снижение значений оптической характеристики. Однако при последующей коагуляции и осаждением частиц шлама K_{oc} растет.

Для варианта с образцом №3 за время испытаний биений не зафиксировано. Следовательно, можно предположить повышенную сорбционную активность указанной ЭИБ по сравнению с остальными испытанными видами отливок из сосны и бамбука.

Выборочно (через 270, 301 и 330 ч старения) были определены и зафиксированы изображения проб жидкостей с увеличением 400х, примеры которых представлены на рис. 3.8 – 3.11.

Типичные микрофотографии проб трансформаторного масла марки ГК (400х)

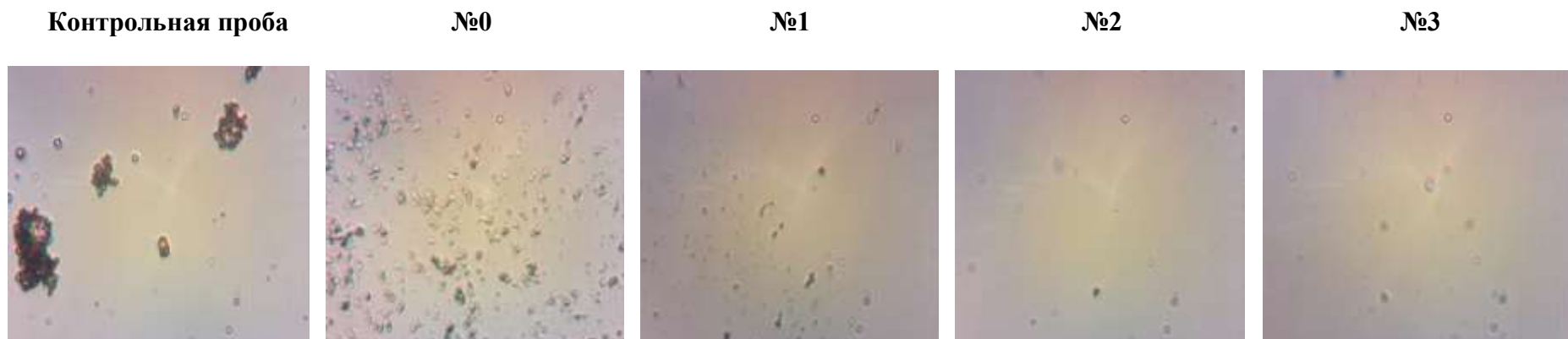
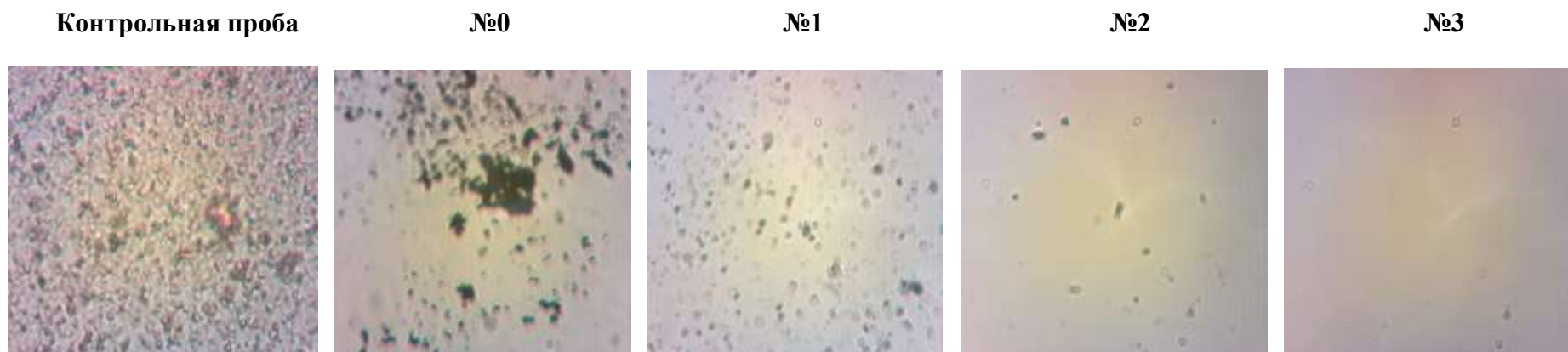


Рис. 3.8. Микрофотографии проб трансформаторного масла марки ГК после 270 часов термостарения в контакте с медным катализатором (контрольная проба), а также – с медью и образцами ЭИБ №0 - №3



на дне бюксы осел шлам

на дне шлама нет

Рис. 3.9. Микрофотографии проб трансформаторного масла марки ГК после 310 часов термостарения в контакте с медным катализатором (контрольная проба), а также – с медью и образцами ЭИБ №0 - №3



Рис. 3.10. Микрофотографии проб трансформаторного масла марки ГК после 330 часов термостарения в контакте с медным катализатором (контрольная проба), а также – с медью и образцами ЭИБ №0 - №3



На дне бюкс контрольной пробы и пробы №0 плотный слой шлама (рис. 3.12); в жидкости пробах №2 и №3 – наблюдается шлам; в пробе №3 его нет. В масле всех проб (№0-№3) фиксируются фрагменты бумаги

Рис. 3.11. Микрофотографии проб трансформаторного масла марки ГК после 358 часов термостарения в контакте с медным катализатором (контрольная проба), а также – с медью и образцами ЭИБ №0 - №3

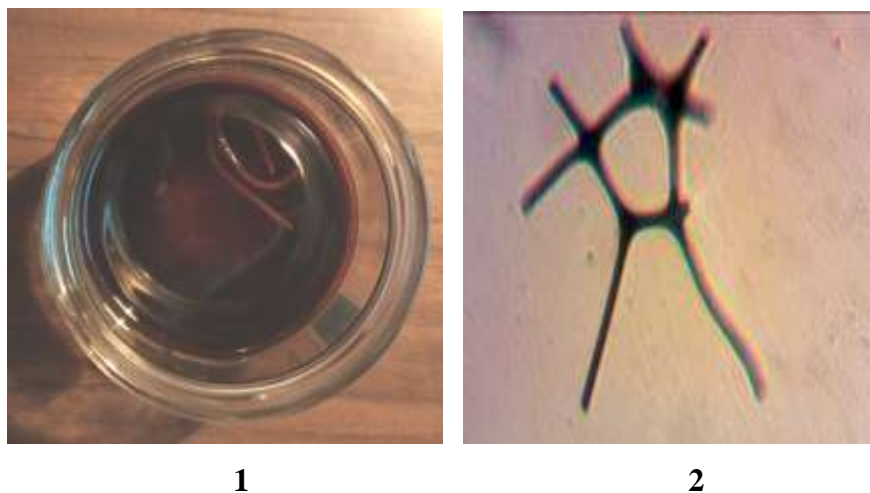


Рис. 3.12. Пример слоя шлама на дне бюксы (контрольная проба) -1; микрофотография (400x) фрагмента волокна бамбука в масле ГК - 2

Следует отметить, что:

1. волокна в пробах масла, старение которого с ЭИБ сосны (№0) значительно крупнее, чем в случае контакта с ЭИБ из бамбука (№1) и композитом из бамбука и БЦ (№2 и №3);

2. фрагменты волокон ВП (Вьетнам) визуальнo отличаются от частиц волокна, обнаруженных в пробах масла, старение которого нами велось (ранее [44]) в контакте с промышленной ЭИБ из бамбука (Бангладеш) – рис. 3.12-2.

Таким образом, можно говорить о повышенной сорбционной активности бамбука по сравнению с сосной.

3.4 Заключение по работе

1. Впервые исследованы опытные виды ЭИБ из целлюлозы бамбука, изготовленные по российской технологии получения целлюлозных диэлектриков.

2. Экспериментально показано, что ЭИБ из бамбука, а также композит из бамбука и бактериальной целлюлозы превосходит традиционную бумагу из сосны по электрической и механической прочности, а также – нагревостойкости и сорбционной активности.

3. Выявлено, что при старении трансформаторного масла в контакте с ЭИБ на основе бамбука шламообразование замедлено по сравнению с традиционным вариантом БПИ.

4. Подтверждено, что ЭИБ с пониженной исходной степенью полимеризации отличается повышенной устойчивостью к развитию термо-окислительных процессов: постепенная деструкция полотна бумаги и снижение её механической прочности замедленно.

К сожалению, вынужденная остановка испытаний не позволила получить более полное представление о нагревостойкости опытных целлюлозных материалов на основе изучения динамики химических характеристик ЭИБ (в частности – степени полимеризации), а также – путем анализа изменения их функции взаимной корреляции в процессе старения, хотя предварительные

исследования (рис. 3.13) показали перспективность этого направления вследствие различий между параметрами волокон целлюлозы. Однако сведения, полученные на данный момент, позволяют утверждать, что целлюлоза бамбука и композиты на её основе, является перспективным сырьем для создания высоковольтных диэлектриков и требуют дальнейшего изучения, в том числе - с применением разрабатываемых оптических методов диагностики.

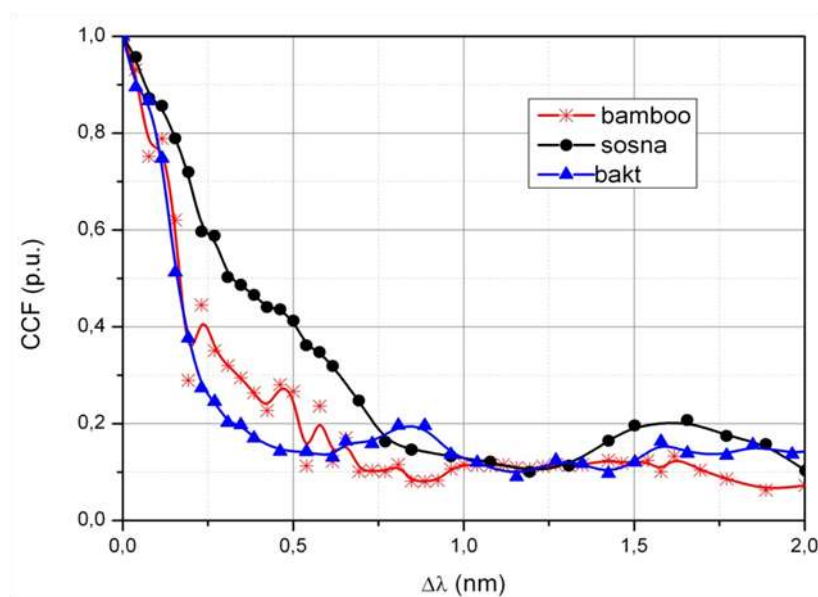


Рис. 3.13. Зависимости $CCF = f(\Delta\lambda)$ для растительных целлюлозных волокон сосны и бамбука, а также – бактериальной целлюлозы

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Резник, А.С. Повышение термостабильности компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции путем структурной модификации целлюлозной бумаги: дис. канд. техн. наук. / А. С. Резник; СПб, 2017. 182 с.
2. Хлыстиков, А.В. Проблемы надежности работы силовых трансформаторов/А.В. Хлыстиков, И.В. Игнатьев// Системы. Методы. Технологии. – 2013. – №3(19). – С. 117 – 120.
3. Carrascal, Isidro & Fernández-Diego, C. & Casado, José & Diego, Soraya & Fernández, Inmaculada & Ortiz, Alfredo. (2018). Quantification of Kraft paper ageing in mineral oil impregnated insulation systems through mechanical characterization. *Cellulose*. 25. 10.1007/s10570-018-1788-1.
4. Электроизоляционные материалы на основе целлюлозы: диэлектрические и механические свойства URL: urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-205622
5. Маслякова, А. В.. Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика с помощью хитозана : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.02.- Санкт-Петербург, 2005.- 204 с.
6. Савина, А.Ю. Усовершенствование системы оптического мониторинга электроизоляционных масел: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Савина Алла Юрьевна – СПб., 2013. – 183 с.
7. Bras, David & Strømme, Maria & Mihranyan, Albert. (2015). Characterization of Dielectric Properties of Nanocellulose from Wood and Algae for Electrical Insulator Applications. *The journal of physical chemistry*. V. 119. 10.1021/acs.jpcc.5b00715.
8. Журавлева, Н.М. 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 (EIconRus), 1– 3 February 2017 Saint-Petersburg, p.1220 – 1223.
9. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года [Электронный ресурс] / ИЭИ РАН, Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации 2014.– С. 173. Режим доступа: https://www.eriras.ru/files/forecast_2040.pdf
10. Zhuravleva, N. On the increasing of the sorption capacity and temperature resistance of cellulosic insulation dielectrics / N. Zhuravleva, A. Reznik, D. Kiesewetter [et al.] // Proceedings of conference ELEKTRO 2016. – 2016. – P. 649 – 653.

11. Хрипунов, А.К. Изучение структурных параметров целлюлозы *acetobacter xylinum* в процессе сушки гель-пленок / А.К Хрипунов. [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2003. Т. 76, В. 6. – С.1017 – 1024.
12. Афанасьев, М.В. Применение бактериальной целлюлозы в производстве бумаги/ М.В. Афанасьев, Е.Г. Смирнова // мат. III Всерос. конф. «Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья» – Барнаул: Изд-во Алтайского университета, 2007 г., в 3 кн. – с. 80 – 83.
13. Осотов, В.Н. Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов [Электронный ресурс]/ В.Н. Осотов // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». – 2016. – С. 49.
Режим доступа: http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf
14. Львов, М.Ю., О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов / М.Ю. Львов [и др.] // Электрические станции. – 2005, № 11. – С. 69 – 75.
15. Журавлева, Н.М. К вопросу 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.
16. Журавлева, Н.М. 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.
17. Журавлева, Н.М. 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 «ELECTRO 2016», 16 – 18 may 2016, Slovak Republic, p.645 – 648.
18. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство URL: https://www.gks.ru/enterprise_economy
19. Update on Global Timber Demand, 2020 URL: <https://darkroom.fimltd.co.uk/>
20. Азаров, В.И. Химия древесины и синтетических полимеров / В.И. Азаров, А. В. Буров, А. В Оболенская. – СПб.: СПбЛТА, 1999. – 628 с.
21. Mirzaie, A Insulation condition assessment of power transformers using accelerated ageing tests / A Turk J., Gholami A., Tayebi H.R., // Elec Eng & Comp Sci. – 2009, Vol. 17, No. 1.– P. 39–54.

22. Кононенко, А.И. Совершенствование диагностики силовых и контрольных кабелей АЭС. Создание компьютеризированного кабельного журнала /Кононенко А.И., Любимова М.П., Циканин А.Г. ФГУП "НИИП", г. Лыткарино; Немытов С.А., Самовичев В.Г., Титовец В.В. Концерн "Росэнергоатом", г. Москва.// 9 Стр.
http://www.niipriborov.ru/sites/default/files/pic/upr_star/article/publication-03.pdf
23. Журавлева, Н.М. 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.
24. Assessment of the Effect of commercial Vegetal Oils on Kraft Paper Ageing through Mechanical Characterization / Cristina Fernandez-Diego, Alfredo Ortiz, Inmaculada Fernandez, Isidro Carrascal, Carlos J. Renedo and Fernando Delgalo // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 5; October 2018 pp. 1880-1887.
25. Alfredo Ortiz, Cristina Fernandez-Diego, Jaime Sanz, Ernesto Ivan Diestre, Severiano Perez, Ismael Vela. Impregnation processes of insulation rigid components of cellulose in synthetic ester and mineral oil // 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Roma, Italy, June 23-27, 2019, 4 Page.
26. Журавлева, Н.М. Способ изготовления электроизоляционной бумаги и картона / М.Н. Морозова, Н.М. Журавлева, Д.М. Фляте и др.// АС №1067114А. Приор. от 15.01.84. – Бюл.№2.
27. Патент № 2648640 РФ Способ получения электроизоляционной бумаги /Е.Г. Смирнова, Н.М. Журавлева, А.С. Резник// 2018. Бюл. № 9.
28. Журавлева, Н.М. Способ получения электроизоляционной бумаги / Н.М. Журавлева, Б.И.Сажин, Е.Г. Смирнова, А.К. Хрипунов, А.А. Ткаченко // Пат. № 2415221 РФ, 2011.
29. Смирнова, Е.Г. Повышение устойчивости бумаги к старению формированием ее композиционного состава. ... д-ра техн. наук: 05.21.03 / Смирнова Екатерина Григорьевна – СПб., 2014. – 311 с.
30. N Zhuravleva, A Reznik, D Kieseewetter, A Stolpner, A Khripunov Possible applications of bacterial cellulose in the manufacture of electrical insulating paper // IOP Journal of Physics: Conf. Series 1124, 2018, 031008, p. 1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/1124/3/031008
31. Способ получения целлюлозы / Пазухина Г.А., Нгуен Тхи Нга// АС № 1714012. 1991
32. Влияние сырья на нагревостойкость электроизоляционной бумаги» / Т. Мазумдер, Ю.А.Полонский, Н.М. Журавлева // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2002, №4, с.119-122.

33. Zhuravleva, Natalia Study of electrophysical properties of electrical insulating paper made of low polymerisation degree cellulose /Natalia Zhuravleva, Dmitry Kiesewetter, Alexandr Reznik, Ekaterina Smirnova, Albert Khripunov, Victor Malyugin, Nquyen Ngoc Tan and Nquyen Tran An Tuan//
AIP Conference Proceedings 2308, 030008 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0033402>
34. Где растет бамбук в России URL: <https://40let-uma-palata.ru/gde-v-rossii-rastyot-bambuk/>
35. Где растет бамбук URL: <https://xn--e1aahgrctjf9g.com/gde-rastet-bambuk>
36. Выращивание бамбука URL: bamboopro.ru/grow
37. Где растет бамбук в России URL: <https://bazaogoroda.ru/gde-rastet-bambuk-v-rossii/>
38. Обработка экспериментальных данных: Учебное пособие / Б.Д. Атапьев, В.Н. Белов, Ф.П. Кесаманлы и др. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2000. – 84 с.
39. Гут, Х.- Х. Исследование нагревостойкости изоляционной бумаги : дис. ... канд. техн. наук / Х.- Х. Гут ; Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина; науч.рук. В. Т. Ренне; науч.рук. П. Н. Перфилов .— Л., 1974 .— 149 с.
40. Mirzaie, A insulation condition assessment of power transformers using accelerated ageing tests / A Turk J., Gholami A., Tayebi H.R., // Elec Eng & Comp Sci. – 2009, Vol. 17, No. 1.– P. 39–54.
41. Arakelyan, V.G. Studies of Thermal Aging of Insulating Fluids: Part 1. Mechanisms and Kinetics of Aging / V.G. Arakelyan // Russian Electrical Engineering. – 2007, Vol. 78, No. 7.– P. 380–389.
42. Singha, S Comparative aging characteristics between a high oleic natural ester dielectric liquid and mineral oil / S. Singha [et al.] // IEEE Transaction on Dielectrics and electrical Insulation – 2014., No. 1.– P. 149–158.
43. Perrier, C. Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters / C. Perrier ,A. Beroual, J-L. Bessede // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2006.Vol. 13, No. 3. – P. 556–564.
44. Ташланов, Д.О. Исследование структурных факторов на работоспособность электроизоляционной бумаги: выпускная квалификационная работа магистра / Д.О. Ташланов; СПб, 2018. 85 с.
45. Столпнер, А.М. Совершенствование электрофизических свойств целлюлозных диэлектриков путем использования биополимера: выпускная квалификационная работа магистра / А.М. Столпнер; СПб, 2019. 70 с.