



DOI: 10.18721/JEST.240107  
УДК 621.3.048.1

*Н.М. Журавлева<sup>1</sup>, Д.В. Кизеветтер<sup>1</sup>, А.С. Резник<sup>1</sup>,  
Е.Г. Смирнова<sup>2</sup>, А.К. Хрипунов<sup>3</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,  
Санкт-Петербург, Россия

3 – Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

### **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ОСНОВЫ БИОПОЛИМЕРОМ**

В статье рассмотрена возможность повышения электрофизических свойств и нагревостойкости целлюлозной диэлектрической бумаги (компонента высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции) за счет использования биополимера как в качестве основы, так и для модификации материала из традиционного растительного сырья. В ходе научных исследований получены опытные образцы изоляционных бумаг, обладающие преимуществами по ряду электрофизических свойств, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики твердого диэлектрика. Установлено влияние модификации на устойчивость твердого диэлектрика к длительному термовоздействию в среде электроизоляционной пропитывающей жидкости. Рассмотрена перспективность технологического приема дезинтегрирования биополимера, что открывает возможность его применения в промышленном производстве целлюлозных диэлектриков. Показана целесообразность создания целлюлозных диэлектриков нового поколения, отличающихся повышенными электрофизическими характеристиками, как полноценной альтернативы растительной целлюлозе, получаемой из хвойных пород древесины.

БУМАЖНО-ПРОПИТАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ; ЦЕЛЛЮЛОЗА; БИОПОЛИМЕР; МОДИФИКАЦИЯ; СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР.

*Ссылка при цитировании:*

Н.М. Журавлева, Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник, Е.Г. Смирнова, А.К. Хрипунов. Электрофизические характеристики бумажно-пропитанной изоляции при модификации целлюлозной основы биополимером // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 75–86. DOI: 10.18721/JEST.240107.

*N.M. Zhuravleva<sup>1</sup>, D.V. Kiesewetter<sup>1</sup>, A.S. Reznik<sup>1</sup>,  
E.G. Smirnova<sup>2</sup>, A.K. Khripunov<sup>3</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Saint Petersburg state forest technical university under name of S.M. Kirov,  
St. Petersburg, Russia

3 – Institute of macromolecular compounds RAS, St. Petersburg, Russia

### **ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF PAPER-IMPREGNATED INSULATION BY MODIFYING THE CELLULOSE BASE WITH A BIOPOLYMER**

In this paper, we have considered the possibility of improving the electrophysical properties and heat resistance of dielectric cellulose paper (a component of high-voltage paper-impregnated insulation) by using a biopolymer as a basis and as a modifier for traditional cel-

lulose. We have obtained prototypes of insulating papers with enhanced electrophysical properties allowing to improve the performance characteristics of a solid dielectric. We have established that modification affects the stability of a solid dielectric against long thermal exposure in an electrical insulation fluid. We have considered the prospects of the technological method of biopolymer disintegration, which can be used in industrial production of cellulosic dielectrics. We have established that it is expedient to create new-generation cellulose dielectrics, which are a valuable alternative to plant cellulose obtained from coniferous woods, differing by their increased electrophysical characteristics.

PAPER-IMPREGNATED INSULATION; CELLULOSE; BIOPOLYMER; MODIFICATION; POWER TRANSFORMER.

*Citation:*

N.M. Zhuravleva, D.V. Kiesewetter, A.S. Reznik, E.G. Smirnova, A.K. Khripunov. Electrophysical characteristics of paper-impregnated insulation by modifying the cellulose base with a biopolymer, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 75–86, DOI: 10.18721/JEST.240107.

### Введение

Одна из серьезнейших проблем современных энергосистем состоит в необходимости повышения надежности и работоспособности таких силовых объектов, как высоковольтные трансформаторы и кабели. Их отказы и различные техногенные инциденты, связанные с ними, приводят к существенным сбоям в энергоснабжении и значительным материальным потерям. Применительно к силовым трансформаторам (СТ) ситуация осложнена отсутствием возможности достоверно оценить состояние базовой бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) и дать четкий прогноз её остаточного ресурса вследствие непредсказуемости возникновения коротких замыканий [1]. Действительно, если разрушение пропитывающей среды в процессе эксплуатации негативно сказывается на диэлектрических характеристиках БПИ и способствует дальнейшему нагреву изоляции (вследствие роста диэлектрических потерь и в результате нарушения теплоотвода при осаждении шлама)<sup>1</sup>, то деструктивные процессы в целлюлозном компоненте сопровождаются морфологическими изменениями и потерей механической прочности электроизоляционной бумаги (ЭИБ). Поэтому динамические усилия, возникающие

при коротких замыканиях и вызывающие относительное движение проводников, — дополнительный опасный фактор, особенно по отношению к бумаге пониженной прочности [2, 3]. В то же время статистически доказано, что именно старение БПИ чаще всего является причиной, приводящей к крайне нежелательным последствиям, включая отказы, взрывы и пожары [3–5]<sup>2, 3</sup>. Иными словами, пригодность к полноценной эксплуатации идентичных СТ со временем может быть в значительной мере разной. Очевидна необходимость повышения механической прочности и нагревостойкости целлюлозного материала, а также изучения факторов, влияющих на указанные показатели ЭИБ [6–8]<sup>3</sup>.

Особого внимания заслуживает модификация электроизоляционной бумаги, в частности со структурообразующими компонентами [9]<sup>2, 3</sup>. Хорошо известно<sup>2</sup>, что при производстве целлюлозных диэлектриков в нашей стране используется электроизоляционная целлюлоза (ЭИЦ) сульфатной варки, которая составляет основу

<sup>1</sup> Савина А.Ю. Усовершенствование системы оптического мониторинга электроизоляционных масел: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 183 с.

<sup>2</sup> См. также: Маслякова А.В. Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика путем его модификации хитозаном: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 204 с.

<sup>3</sup> См. также: Резник А.С. Повышение термостабильности компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции путем структурной модификации целлюлозной бумаги: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 182 с.



трансформаторной, кабельной и конденсаторной бумаги. Под «модификацией основы» обычно понимают введение в состав материала дополнительных компонентов, зачастую инородных по отношению к целлюлозе, с целью совершенствования тех или иных свойств диэлектрика, что может отрицательно сказаться на не менее значимых характеристиках ЭИБ. Так, например, было предложено [6] использовать мелкодисперсный порошок оксида алюминия для повышения природной сорбционной активности целлюлозных бумаги и картона, т. е. способности связывать продукты старения компонентов БПИ, ионы металлов и ионогенные примеси (тем самым обеспечивая некоторую стабилизацию изоляции по параметру  $\text{tg } \delta$ )<sup>2</sup>. Однако частицы модификатора с абразивными краями удерживались в целлюлозной основе механически, снижая прочность указанных диэлектриков и усугубляя экологические проблемы вследствие высыпания частиц адсорбента. В то же время совершенствованию свойств ЭИБ и повышению работоспособности БПИ в перспективе может способствовать развитие работ по использованию в высоковольтной изоляции так называемой бактериальной целлюлозы (БЦ) — биополимера, получаемого, в частности, дезинтеграцией нано-гель-пленки целлюлозы *Glucanacetobacter xylinus* (НГП ЦГХ) [9]<sup>4</sup>. Являясь полным аналогом растительной целлюлозы (РЦ), ЦГХ по надмолекулярной организации имеет существенные отличия, в частности: диаметр кристаллических микрофибрилл составляет в среднем всего 50–60 Å, а внутренняя удельная поверхность характеризуется чрезвычайной развитостью (не менее 500 м<sup>2</sup>/г). Известно, что сетка нано-лент НГП ЦГХ активно удерживает воду (100 г на 1 г сухого полимера) [10], которая может быть полностью или частично заменена на лекарственные препараты, разнообразные органические и неорганические соедине-

<sup>4</sup> См. также: Архарова Н.А. Структура композитов на основе целлюлозы *glucanacetobacter xylinus* и наночастиц различной природы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 142 с.

ния, масла или иные элементы, необходимые для получения различных композиционных материалов [11]<sup>4</sup>, включая диэлектрики [9]<sup>3,5</sup>, что представляется актуальной и практически полезной задачей.

**Цель нашей работы** — изучение свойств целлюлозных диэлектриков, полученных с применением нано-гель-пленки ЦГХ, их совместимости с жидкими диэлектриками, а также целесообразности использования перспективных электроизоляционных материалов для повышения работоспособности высоковольтной БПИ.

#### **Объекты исследования**

нано-гель-пленки ЦГХ различной толщины;

бумагоподобный материал из ЦГХ (для дезинтеграции целлюлозы использовался профессиональный блендер JTC OmniBlend I, модель ТМ-767);

образцы бумаги из электроизоляционной целлюлозы, модифицированные ЦГХ (для розпуска и размола целлюлозы использовался лабораторный ролл Валлея);

образцы электроизоляционной бумаги промышленного производства.

Для пропитки целлюлозных материалов применялось нефтяное трансформаторное масло марки ГК Ангарского нефтеперерабатывающего завода, широко используемое в высоковольтном трансформаторостроении.

Толщина  $h$  целлюлозных образцов варьировалась в пределах от 0,003 мм (НГП ЦГХ) до 0,142 мм (ЭИБ из растительной целлюлозы).

#### **Методика измерений**

**Определение кратковременной электрической прочности ( $E_{\text{пр}}$ , кВ/мм) ЭИБ.** Оценка  $E_{\text{пр}}$  (по 10–20 значений на точку) осуществлялась с использованием высоковольтной пробивной установки (скоростью подъема напряжения составляла 3 кВ/с) и электродной системы «шар (диаметр 6 мм) — плоскость» (диаметр 25 мм).

<sup>5</sup> См. также: Патент РФ. № 2415221. Способ получения электроизоляционной бумаги / Журавлева Н.М., Сажин Б.И., Смирнова Е.Г., Хрипунов А.К., Ткаченко А.А. Приоритет. 30.04.2010.

**Определение механической прочности на разрыв.** Для сравнительной оценки предела механической прочности на разрыв  $\sigma_p$ , МПа целлюлозных образцов применялся испытательный стенд серии ES (модель ESM301/ESM301L) компании MAPK-10. При испытании образцов малой толщины использовалось разрывное устройство УТС 201-10.

Испытывались фрагменты материала (ширина 15 мм, длина 60 мм) по 5–20 образцов на точку.

**Определение коэффициента относительного светопропускания проб жидкого диэлектрика ( $K_{oc\ 458}$ , %).** Измерения (по 3–5 замеров на точку) проводились с использованием микроколориметра МКМФ-1 в видимом диапазоне длин волн ( $\lambda = 458$  нм). В качестве эталона, светопропускание которого было принято за 100 %, использовался глицерин.

**Оценка совместимости компонентов БПИ.** Анализировалось изменение  $K_{oc\ 458}$  проб электроизоляционной жидкости в процессе ускоренного термостарения (при температуре 140 °С в закрытых стеклянных бюксах), которое проводилось в контакте с исследуемыми целлюлозными диэлектриками и спиральями медного проводника, активизирующими термоокислительную деструкцию образцов (в дальнейшем – «медный катализатор»). Присутствие «меди» обусловлено контактом компонентов БПИ с медными проводниками СТ.

**Мониторинг состояния фрагментов ЭИБ при помощи увеличительной техники.** Анализ морфологических особенностей образ-

цов ЭИБ в сухом состоянии проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа (SEM) SUPRA-55VP-25-78 (Zeiss) – по 20 изображений на фрагмент материала с различной степенью увеличения. Степень разрушения целлюлозных диэлектриков в процессе термостарения в среде электроизоляционной жидкости (в среднем по 10–20 микрофотографий на точку) оценивалась при помощи микроскопа «Analyt» и камеры «Celestron» (Digital microscope image) с выводом изображения на монитор персонального компьютера.

**Определение состава по волокну.** Для анализа волокна использовали прибор «Fiber – Tester» фирмы «Lorentz & Wettre» и «LDW–STSI» (Швеция).

### Полученные результаты

С целью изучения диэлектрических свойств опытного материала на основе биополимера была определена кратковременная электрическая прочность образцов нано-гель-пленки ЦГХ различной толщины. На рис. 1, *а* показан внешний вид НГП ЦГХ (в дальнейшем – НГП) в водной среде, а на рис. 1, *б* – один из исследованных образцов (толщина 0,016 мм) указанной нативной НГП, полученной в результате поверхностного культивирования биосинтеза и очищенной до химически чистого состояния от следов питательной среды и клеток GX с последующим высушиванием на стекле при комнатной температуре.

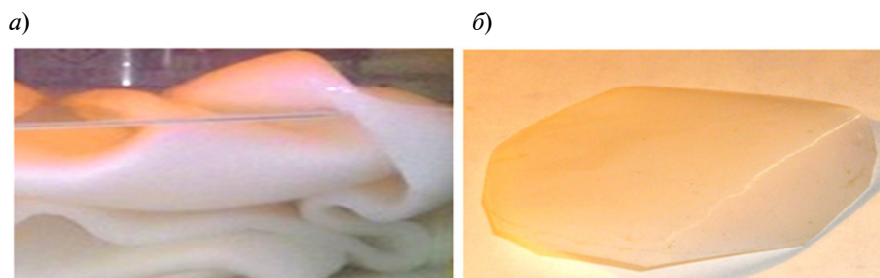


Рис. 1. НГП ЦГХ в водной среде (*а*) и пример опытного образца целлюлозного диэлектрика из НГП ЦГХ толщиной 0,016 мм (*б*)

Fig. 1. NGF CGX in water (*a*) prototype of NGF CGX cellulose dielectric 0,016 mm thick (*b*)

В табл. 1 приведены значения  $E_{пр}$  (средние из 10 измерений) образцов НГП различной толщины  $h$  и (для сравнения) промышленной электроизоляционной конденсаторной бумагой разных производителей. Разброс ( $K_{вар}$ , %) значений характеристики (более 15 %) обусловлен отсутствием отработанной технологии получения опытного материала. Однако представленные результаты, на наш взгляд, интересны тем, что демонстрируют возможность получения целлюлозных диэлектриков малой толщины.

Таблица 1  
Значения  $E_{пр}$  целлюлозных диэлектриков

Table 1  
The average value of the electric strength  $E_{пр}$  of cellulose dielectrics

Образец диэлектрика	$h$ , мкм	$E_{пр}$ , кВ/мм	$K_{вар}$ , %
ЭИБ китайского производства	8,0	44	5,0
ЭИБ российского производства	8,0	54	6,1
НГП ЦГХ	3,0	82	16,7
	3,5	84	20,6
	5–7	58	27
	8,0	61	19,5
	16,0	48	6,3
	20,5	38	9,8

Анализ результатов (табл. 2) определения предела механической прочности на разрыв конденсаторной электроизоляционной бумаги и опытного целлюлозного диэлектрика одинаковой толщины (0,008 мм) позволяет констатировать превосходство материала из НГП ЦГХ перед ЭИБ традиционного исполнения, несмотря на значительный разброс значений  $\sigma_p$ .

Таблица 2  
Значения предела механической прочности на разрыв целлюлозных диэлектриков

Table 2  
The average value of the maximum mechanical tensile strength of cellulose dielectrics

Образец диэлектрика		$\sigma_p$ , МПа	$K_{вар}$ , %
Конденсаторная бумага промышленного производства	1	117	12,5
	2	121	10,3
НГП ЦГХ	1	248	15,8
	2	252	16,0

Далее определялась кратковременная электрическая прочность (по 10 пробоев на точку) целлюлозных образцов толщиной 0,140 мм – см. рис. 2 и табл. 3:

1 – электроизоляционная бумага марки К140 промышленного производства;

2 – опытная ЭИБ состава 90 % ЭИЦ + 10 % ЦГХ [12];

3 – опытная ЭИБ состава 100 % ЦГХ;

4 – нативная НГП ЦГХ, высушенная на воздухе.

Таблица 3

Кратковременная электрическая прочность целлюлозных диэлектриков

Table 3

The electric strength of cellulose dielectrics

Образец диэлектрика	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	$K_{вар}$ , %
1 – 100 % ЭИЦ	9,1	5,5
2 – 90 % ЭИЦ + 10 % ЦБХ	13,7	3,9
3 – 100 % ЦГХ	21,7	13,0
4 – НГП ЦБХ	24,9	10,1

При изготовлении образцов 2 и 3 для роспуска и размола сырья использовался ролл Валлея.

Диаграмма (рис. 2), в которой за 100 % принято значение  $E_{пр}$  эталона (промышленная трехслойная ЭИБ марки К140), демонстрирует существенное превосходство (как минимум в 2 раза) материалов из 100 % ЦГХ НГП ЦГХ над традиционной ЭИБ и в 1,5 раза – над образцом, содержащим в композиции 10 % ЦГХ.

Предел механической прочности на разрыв определялся для образцов 1–3 (по 10 значений на точку) в процессе ускоренного термостарения в воздушной среде при температуре 140° (рис. 3).

НГП ЦГХ не испытывалась вследствие недостаточного количества материала, но известно, что она способна выдерживать до 10 ГПа на разрыв [11]. Для образца из 100 % ЭИЦ зафиксировано ожидаемое снижение значения характеристики (на 28 %) на момент окончания термостарения. Образец бумаги, содержащий 10 % ЦГХ, показал повышенную устойчивость к термовоздействию: снижение  $\sigma_p$  составило 6,5 %, тогда как прочность ЭИБ из 100 % ЦГХ за указанный период времени практически не изменилась.

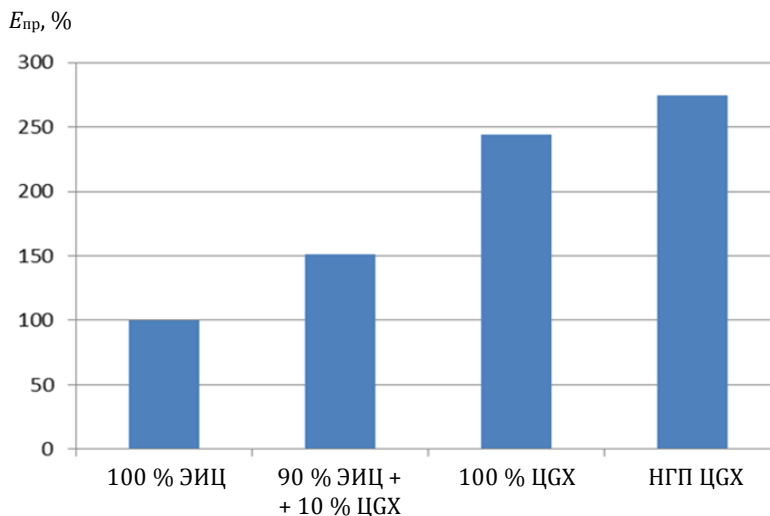


Рис. 2. Кратковременная электрическая прочность  $E_{пр}$  целлюлозных диэлектриков  
 Fig. 2. The electric strength  $E_{пр}$  of cellulose dielectrics

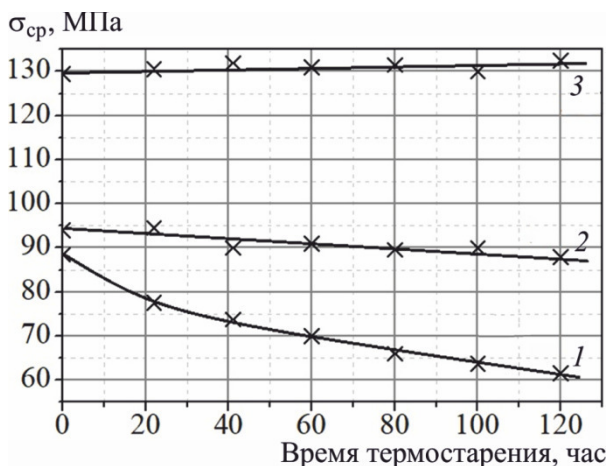


Рис. 3. Зависимости предела механической прочности на разрыв ( $\sigma_{р,ср}$ ) от времени термостарения образцов электроизоляционной бумаги следующих составов:  
 1 – 100 % ЭИЦ; 2 – 90 % ЭИЦ + 10 % ЦГХ;  
 3 – 100 % ЦГХ  
 Fig. 3. Dependence of average value of the maximum mechanical tensile strength ( $\sigma_{р,ср}$ ) on thermal aging time for electrical insulation paper:  
 1 – 100 % EIC; 2 – 90 % EIC + 10 % CGX;  
 3 – 100 % CGX

Визуальная оценка состояния фрагментов ЭИБ из 100 % ЭИЦ (1) и 100 % ЦГХ (3) после термостарения в течение 220 ч в среде нефтяного масла марки ГК в контакте с медным проводником (оказывающим каталитическое влияние на процессы деструкции).

Видно (рис. 4, а), что полотно и край материала из ЦГХ сохранил свою целостность, тогда как полотно и край фрагмента из ЭИЦ (рис. 4, б) интенсивно разрушается.

Параллельно в процессе старения определялась сорбционная активность обеих видов ЭИБ по отношению к продуктам деструкции твердых и жидких диэлектрических материалов. С этой целью при помощи микроколориметра МКМФ-1 снимались зависимости коэффициента относительного светопропускания проб масла на длине волны 458 нм ( $K_{oc\ 458}$ , %), которые сопоставлялись с аналогичной кривой для пробы масла ГК, которое старилось в контакте с медным проводником, но без бумаги (контрольная проба). В пробах, старение которых велось с бумагой обоих видов, светопропускание жидкости оказалось близким и существенно превзошло показатели контрольного образца:  $K_{oc\ 458}$  последнего снизилось до 0 за 148 ч термовоздействия, а у проб масла с бумагой – в среднем за 200 ч старения.

Необходимо отметить, что целлюлозный материал из ЦГХ обладает высокой сорбционной активностью, обеспечивающей замедление процесса шламообразования в масле, что подтвердили наши исследования [9] и наглядно демонстрирует рис. 5.

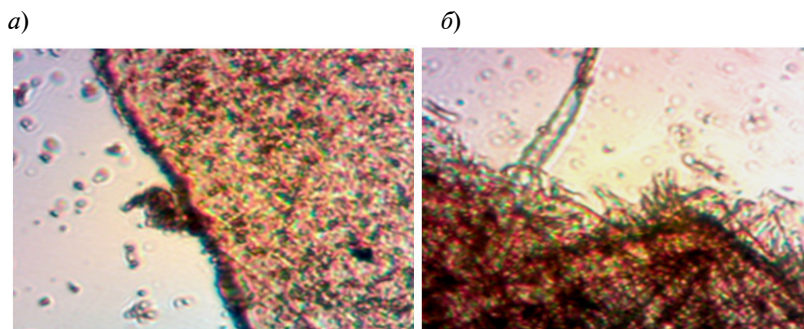


Рис. 4. Микрофотографии ( $\times 400$ ) фрагментов ЭИБ из 100 % ЦГХ (а) и 100 % ЭИЦ (б) после термостарения в масле марки ГК в присутствии медного катализатора  
Fig. 4. Microphotos ( $\times 400$ ) of the samples of EIP consist of 100 % CGX (a) and 100 % EIC (b) after thermal ageing in petroleum oil GK with copper catalyst



Рис. 5. Микрофотографии ( $\times 400$ ) проб трансформаторного масла марки ГК после 180 часов термостарения при температуре 140 °С с медным катализатором (а), а также в присутствии ЭИБ из 100 % ЭИЦ (б) и 100 % ЦГХ (е)  
Fig. 5. Microphotos ( $\times 400$ ) of the samples of transformer oil GK after 180 hours of thermal ageing at the temperature of 140 °C with copper catalyst (a); the same with traditional EIP (б) and with paper of 100 % CGX (e)

Однако за время испытаний по данному показателю превосходства ЦГХ над растительной целлюлозой выявлено не было, что, возможно, связано с тончайшей пористостью бумаги из биополимера.

Полученные результаты, по нашему мнению, указывают на перспективность создания диэлектриков из 100 % НПП ЦГХ. Однако применение традиционной технологии изготовления бумаги на основе данного целлюлозного сырья сталкивается с проблемой роспуска НПП, весьма сложного вследствие высокой структурированности и малой толщины лент бактериальной целлюлозы, что отчетливо показано на рис. 6. На фото (рис. 6, б) степень увеличения последних выше, чем сульфатной хвойной целлюлозы (рис. 6, а): соответственно 8,51 Кх и 5,11 Кх.

При проведении сравнительного анализа состава по волокну образцов бумаги из ЭИЦ (1) и ЦГХ (3) сложность качественного роспуска и размола сырья из биополимера была подтверждена.

Исследовались пробы материалов в виде суспензий, которые содержали по 0,1 г целлюлозы каждая. При этом в первой было зафиксировано порядка  $10^5$  волокон растительной целлюлозы, а во второй – около  $3 \cdot 10^3$  более крупных образований ЦГХ, предположительно возникающих при изменении морфологии НПП в процессе дезинтегрирования.

Из рис. 7, на котором приведены полученные соотношения длины и ширины для волокон ЭИЦ и структурных элементов ЦГХ, видно, что средняя длина последних (0,875 мм) почти вдвое ниже, чем у ЭИЦ (1,386 мм).

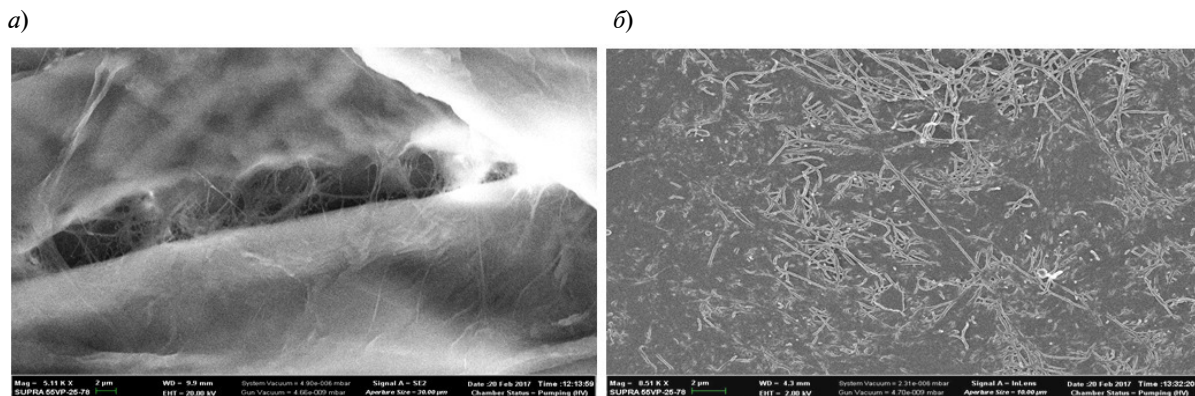


Рис. 6. SEM-микротографии целлюлозных волокон ЭИБ:

*a* – ЭИЦ (5,11 Кх); *b* – ЦГХ (8,51 Кх)

Fig. 6. SEM-microphotos of EIP cellulose fibers: *a* – EIC (5,11 Kx); *b* – CGX (8,51 Kx)

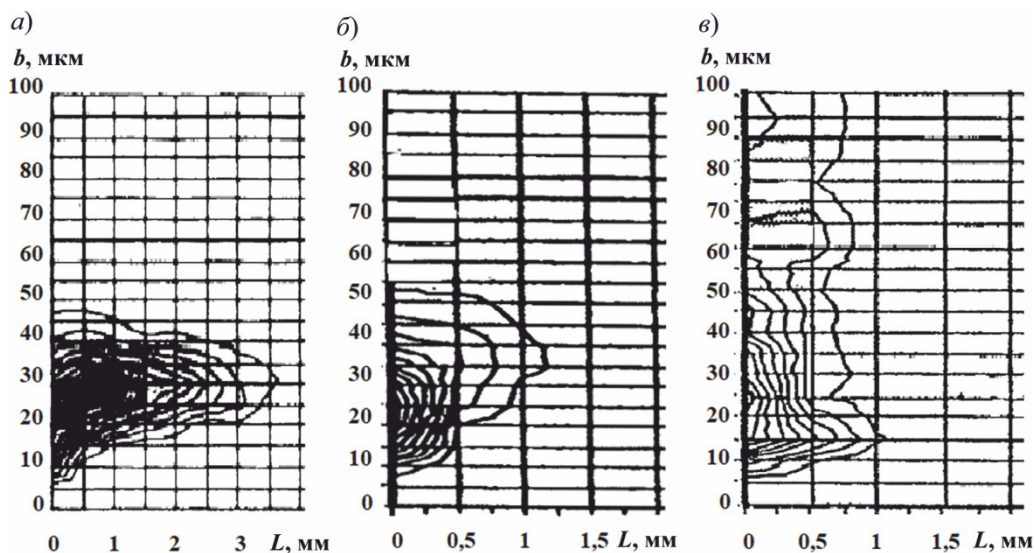


Рис. 7. Соотношения длины ( $L$ ) – ширины ( $b$ ): *a* – волокна ЭИЦ (исходное состояние); структурные элементы ЦГХ: *b* – исходное состояние; *в* – после термостарения

Fig. 7. Length ( $L$ ) and width ( $b$ ): *a* – EIC fibers (initial state); the same for CGX: *b* – initial state; *в* – after thermal ageing

Что касается ширины, то у волокон ЭИЦ и структурных элементов ЦГХ в исходном состоянии ее значения оказались близкими: соответственно 31,3 и 34,8 мкм. Но после термостарения (в течение 120 часов при температуре 140 °С) ширина образований бактериальной целлюлозы аномально выросла до среднего значения 41,9 мкм (рис. 7, *в*). Можно предположить, что эффект связан с постепенными морфологическими нарушениями указанных структурных элементов ЦГХ, что обусловлено процессами деструкции, при которой происходит их расширение и, вероятно, некоторое уменьшение плотности упаковки макромолекул.

С целью устранения указанной проблемы и поиска способов подготовки ЦГХ, менее затратных по времени и энергоёмкости, а также приемлемых для применения в бумажной промышленности, нами впервые были испытаны образцы, изготовленные с использованием нового способа дезинтегрирования нативной НПП ЦГХ: при помощи профессионального (JTC OmniBlend I, модель ТМ-767) блендера с последующим отливом коллоидной суспензии целлюлозы на подложку. Из-за отсутствия отработанной технологии получения материала отливки были неоднородны по толщине и содержали воздушные «пузыри» (рис. 8). Это сказалось на разбросе результатов.



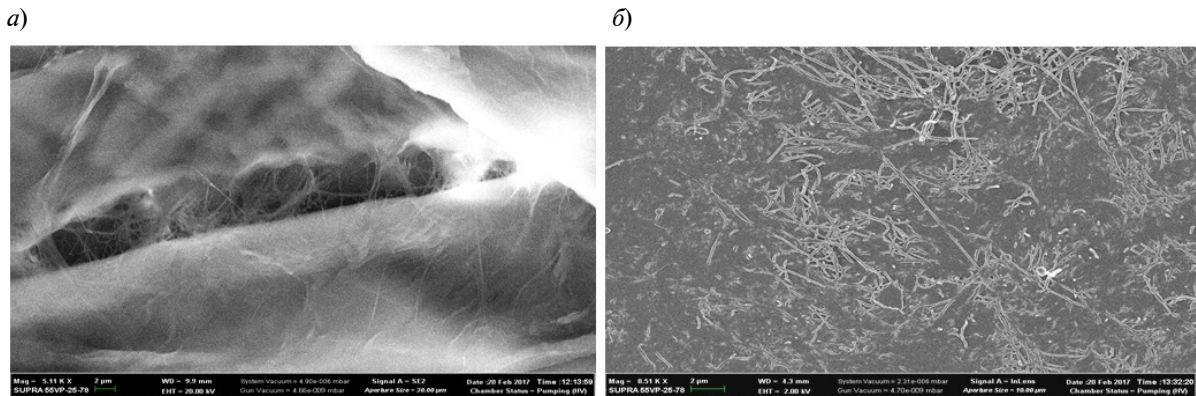


Рис. 6. SEM-микрофотографии целлюлозных волокон ЭИБ:

*a* – ЭИЦ (5,11 Кх); *b* – ЦГХ (8,51 Кх)

Fig. 6. SEM-microphotos of EIP cellulose fibers: *a* – EIC (5,11 Kx); *b* – CGX (8,51 Kx)



Рис. 8. Опытная отливка из ЦГХ:

*a* – внешний вид; SEM-снимки: *b* – поверхность (×72) и *в* – морфологические структуры образца (43,99 Кх)

Fig. 8. Specimen of CGX-modified paper:

*a* – visual appearance; SEM-photos: *b* – surface (×72) и *в* – structure of specimen (43,99 Kx)

В табл. 4 приведены результаты сравнительной оценки кратковременной электрической прочности целлюлозных диэлектриков, полученных с применением различных технологий. Выявлено, что, не-

смотря на отмеченные недостатки, отливки превосходят по  $E_{пр}$  промышленную ЭИБ (1) в среднем в 6 раз, ЭИБ из ЦГХ (3) как минимум в 3 раза и даже в 2 раза НПП ЦПЧ (4).

Таблица 4

Значения кратковременной электрической прочности электроизоляционных материалов из растительной и бактериальной целлюлозы

Table 4

The average value of the electric strength of electrical insulation materials consist of pine-tree and bacterial cellulose

№ образца	Состав образца,изготовитель	Толщина $h_{ср}$ , мм	$E_{пр,ср}$ , кВ/мм	$K_{стан}$ , %
1	Промышленный образец ЭИБ марки К-140	0,140	9,1	6,4
2	Опытная ЭИБ состава: 90 % ЭИЦ + 10 % ЦГХ	0,140	14,2	6,2
3	Опытная ЭИБ состава: 100 % ЦГХ	0,139	22,5	14,1
4	НПП ЦГХ (сушка на воздухе)	0,142	25,2	11,8
5	Опытный образец состава: 100 % ЦГХ (размол в блендере)	0,137	58,0	22,3
6	Опытный образец состава: 100 % ЦГХ (размол в блендере)	0,120	69,4	23,0

Из-за малого количества исследуемого опытного материала оценка предела механической прочности на разрыв носит исключительно предварительный характер. Однако можно утверждать, что средние значения  $\sigma_p$  промышленной ЭИБ из ЭИЦ (1) и отливки из ЦГХ (5) одного порядка (несмотря на неоднородность структуры последнего): соответственно 86 и 80 МПа.

С целью проверки впитывающей способности указанные образцы, предварительно высушенные при 100 °С в течение 1 часа были залиты нагретым до 50 °С нефтяным маслом марки ГК и выдержаны при комнатной температуре в течение 48 часов. Затем при помощи фильтровальной бумаги масло удалили с поверхности ЭИБ и определили  $E_{пр}$  материалов. Хорошо известно, что термо-вакуумная сушка с последующей пропиткой жидкими диэлектриками позволяет повысить кратковременную электрическую прочность бумаги на порядок. В данном случае вакуумирование не применялось (то есть воздух и влага не были удалены из объема образцов), вследствие чего увеличение электрической прочности было значительно ниже:  $E_{пр\ ср}$  промышленной ЭИБ (1) возросло в 4 раза (с 8,7 до 42 кВ/мм), а ЭИБ из 100 % ЦГХ – в 2 раза (с 62 до 112 кВ/мм). Однако указанная характеристика отливки оказалась значительно выше, чем у ЭИБ из растительной ЭИЦ, изготовленной по традиционной технологии, несмотря на тот факт, что тончайшая пористость ЦГХ усложняет проникновение жидкости в материал. Причем можно предположить, что даже при частичном вытеснении воздуха маслом развитие частичных разрядов будет тормозиться минимальным размером пустот и воздушных включений.

## Выводы

Подтверждено, что использование бактериальной целлюлозы для получения диэлектрических материалов способствует повышению кратковременной электрической и механической прочности бумаги.

Доказано, что ЭИБ из бактериальной целлюлозы отличается повышенной нагревостойкостью как на воздухе, так и в среде нефтяного масла.

Впервые экспериментально показана возможность применения блендера для дезинтегрирования нано-гель-пленки ЦГХ, что открывает перспективы её использования для промышленного производства диэлектриков.

Выявлено, что отсутствие фибрилляции при использовании блендера для дезинтегрирования НПП БЦ (которое имеет место при размоле целлюлозы в ролле Валлея и признано полезным с точки зрения повышения механической прочности бумаги), предположительно, может быть компенсировано частичным нарушением структуры образований ЦГХ в процессе старения за счет образования дополнительной «сцепки» между ними (как механической, так и вследствие возникновения водородных связей).

В целом можно заключить, что работы, направленные на создание целлюлозных диэлектриков нового поколения, отличающихся повышенными электрофизическими характеристиками и нагревостойкостью, являющихся полноценной альтернативой растительной целлюлозы, получаемой из хвойных пород древесины, целесообразны, практически полезны и вносят вклад в развитие новых ресурсо- и энергосберегающих технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осотов В.Н.** Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С. 49. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15.\\_Osotov\\_V.N.\\_Pr](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Pr)

[akticheskie\\_aspekty\\_ocenki\\_sroka\\_sluzhby\\_transformatorov.pdf](#)

2. **Wang W.** A comparative analysis of dielectric properties of oil-paper insulation and polymer materials before and after thermal aging // Science China Technological Sciences. 2014. Vol. 57. No 4. P. 738–746.



3. Geissler D., Leibfried T. Mechanical breakdown of aged insulating paper around continuously transposed conductors for power transformers under the influence of short-circuit forces – analysis by numerical simulations // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). 2015. P. 401–406.
4. Heywood R., Jarman P., Ryder S. Transformer Asset Health Review: Does it really work? // Proceedings of CIGRE. Session 45. 2014. 8 p.
5. Лоханин А.К. Краткие обзоры докладов 43 сессии СИГРЭ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. № 3. С. 80–87.
6. Müllerova E. Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. No 4. P. 2379–2389.
7. Perrier C. Aging behavior of cellulosic materials in presence of mineral oil and ester liquids under Various Conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20. No 6. P. 1971–1976.
8. Duval M, de Pablo A., Atanasova-Hoehlein I., Grisaru M. Significance and detection of very low degree of polymerization of paper transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2017. Vol. 33. No 1. P. 31–38.
9. Zhuravleva N., Reznik A., Kiesewetter D., Tukacheva A., Smirnova E. About the Possibilities of Increasing the Reliability of Paper-Impregnated Insulation of Power Transformers // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga technical University (RTUCON-2016), 14–18 oct. 2016. 4 p.
10. Brown R.M. The Biosynthesis of Cellulose // Journal of Macromolecular Science. – Part A Pure and Applied Chemistry. 1996. Vol. 33 (10). P. 1345–1373.
11. Keshk S. Bacterial cellulose production and its industrial applications // J. Bioprocessing and Biotechniques. 2014. Vol. 4. P. 1–10.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: Natalia\_Zhurav@mail.ru

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

E-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

**РЕЗНИК Александр Сергеевич** – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: alexreznik85@gmail.com

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

E-mail: smirnova@smirnova@mail.ru

**ХРИПУНОВ Альберт Константинович** – кандидат химических наук старший научный сотрудник Института высокомолекулярных соединений РАН

E-mail: biocell@mail.macro.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 03.02.2018

#### REFERENCES

- [1] Osotov V.N. Prakticheskie aspekty otsenki fakticheskogo sroka sluzhby silovykh transformatorov. *III Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Kontrol' tekhnicheskogo sostoianiia oborudovaniia ob'ektov energetiki»*. 2016. S. 49. [Elektronnyi resurs]. URL: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15\\_Osotov\\_V.N.\\_Prakticheskie\\_aspekty\\_ocenki\\_sroka\\_sluzhby\\_transformatorov.pdf](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15_Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf) (rus.)
- [2] Wang W. A comparative analysis of dielectric properties of oil-paper insulation and polymer materials before and after thermal aging. *Science China Technological Sciences*. 2014. Vol. 57. No 4. P. 738–746.
- [3] Geissler D., Leibfried T. Mechanical breakdown of aged insulating paper around continuously transposed conductors for power transformers under the influence of short-circuit forces – analysis by numerical simulations. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2015. P. 401–406.
- [4] Heywood R., Jarman P., Ryder S. Transformer Asset Health Review: Does it really work? *Proceedings of CIGRE*. Session 45. 2014. 8 p.
- [5] Lokhanin A.K. Kratkie obzory dokladov 43 sessii SIGRE. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*. 2010. № 3. S. 80–87. (rus.)

[6] **Müllerova E.** Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22. No 4. P. 2379–2389.

[7] **Perrier C.** Aging behavior of cellulosic materials in presence of mineral oil and ester liquids under Various Conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20. No 6. P. 1971–1976.

[8] **Duval M, de Pablo A., Atanasova-Hoehlein I., Grisar M.** Significance and detection of very low degree of polymerization of paper transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017. Vol. 33. No 1. P. 31–38.

[9] **Zhuravleva N., Reznik A., Kieseewetter D., Tukacheva A., Smirnova E.** About the Possibilities of Increasing the Reliability of Paper-Impregnated Insulation of Power Transformers. *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga technical University (RTU CON-2016)*, 14–18 oct. 2016. 4 p.

[10] **Brown R.M.** The Biosynthesis of Cellulose // *Journal of Macromolecular Science. – Part A Pure and Applied Chemistry*. 1996. Vol. 33 (10). P. 1345–1373.

[11] **Keshk S.** Bacterial cellulose production and its industrial applications. *J. Bioprocessing and Biotechniques*. 2014. Vol. 4. P. 1–10.

#### AUTHORS

**ZHURAVLEVA Nataliia M.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: Natalia\_Zhurav@mail.ru

**KIESEWETTER Dmitrii V.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: dmitrykieseewetter@gmail.com

**REZNIK Aleksandr S.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: alexreznik85@gmail.com

**SMIRNOVA Ekaterina G.** – *Saint Petersburg state forest technical university under name of S.M. Kirov*

E-mail: smirnovalta@gmail.com

**KHRIPUNOV Albert K.** – *Institute of macromolecular compounds RAS*

E-mail: biocell@mail.macro.ru

Received: 03.02.2018