



DOI: 10.18721/JEST.230205

УДК 621.3.048.1

*А.С. Резник, Н.М. Журавлева,
Д.В. Кизеветтер, Д.О. Ташланов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МАКРОМОЛЕКУЛЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В работе изучалось влияние исходной средней степени полимеризации ($СП_0$) макромолекул целлюлозы на электрофизические характеристики электроизоляционной бумаги (ЭИБ) промышленного производства. Проводилась сравнительная оценка кратковременной электрической прочности, а также — изменения СП и механической прочности на разрыв ЭИБ с различной $СП_0$ в процессе ускоренного теплового старения. Подтверждена необоснованность принятых показателей предела работоспособности бумаги. Анализ экспериментальных результатов проводился на базе микрофотографий (полученных при помощи SEM), наглядно иллюстрирующих структурные изменения целлюлозной основы ЭИБ. Результаты работы корректируют представления о пределе физического существования целлюлозных волокон и взаимосвязи ресурса ЭИБ с $СП_0$. На основе полученных сведений сформулированы предположения о причинах расхождения экспериментальных и расчетных значений СП и механической прочности бумаги, а также о факторах, лежащих в основе несоответствия времени достижения материалом предельного состояния при использовании критериальных характеристик: $СП_{кр} = 200$ ед. и $P_p = 50\%$ (снижение исходной механической прочности на 50%). Обоснована необходимость корректировки представлений о ресурсе целлюлозных диэлектриков и бумажно-пропитанной изоляции. СТЕПЕНЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ; ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ БУМАГА; РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА; БУМАЖНО-ПРОПИТАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ.

Ссылка при цитировании:

А.С. Резник, Н.М. Журавлева, Д.В. Кизеветтер, Д.О. Ташланов. Влияние степени полимеризации макромолекулы целлюлозы на работоспособность бумажно-пропитанной изоляции // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 53–61. DOI: 10.18721/JEST.230205

*A.S. Reznik, N.M. Zhuravleva,
D.V. Kiesewetter, D.O. Tashlanov*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

INFLUENCE OF THE DEGREE OF POLYMERIZATION OF CELLULOSE MACROMOLECULES ON THE OPERABILITY OF PAPER-IMPREGNATED INSULATION OF POWER TRANSFORMERS

The effect of the initial average degree of polymerization (DP_0) of cellulose macromolecules on the electrical properties of industrially produced electrical insulating paper (EIP) was studied. A comparative assessment was conducted on the short-term electric strength, as well as on the changes in the degree of polymerization and the mechanical tensile strength of the EIP with different DP_0 in the process of accelerated thermal aging. It has been confirmed that the currently accepted paper operability limits are unreasonable. The analysis of the experimental results was carried out relying on the micrographs (obtained with SEM), which clearly illustrates structural changes in the EIP cellulose base. The results of the study correct the notion of the limit of the physical existence of cellulose fibers and the relationship between the EIP resource and DP_0 . On the basis of the information obtained, the assumptions about the reasons

for the discrepancy between the experimental and calculated values of the DP and the mechanical strength of the paper are formulated, as well as the factors causing the discrepancy between the time when the material reaches a limit state using criterial characteristics: $DP_{cr} = 200$ units and $Pd 50\%$ (the reduction of the initial mechanical strength by 50 %). A reasoned conclusion is given on the need to adjust the views on the resource of cellulosic dielectrics and paper-impregnated insulation.

DEGREE OF POLYMERIZATION OF CELLULOSE; ELECTRICAL INSULATING PAPER; OPERABILITY OF POWER TRANSFORMER; PAPER-IMPREGNATED INSULATION.

Citation:

A.S. Reznik, N.M. Zhuravleva, D.V. Kiesewetter, D.O. Tashlanov, Influence of the degree of polymerization of cellulose macromolecules on the operability of paper-impregnated insulation of power transformers, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 53–61, DOI: 10.18721/JEST.230205

Введение

Надежная работа высоковольтной техники, в частности силовых трансформаторов (СТ), — одно из основных условий бесперебойного функционирования энергосистем (ЭС) и качественного электроснабжения потребителей широкого спектра ответственности. Причем именно СТ в определенной степени можно отнести к весьма проблемным элементам ЭС с той точки зрения, что их отказ зачастую чреват техногенными инцидентами и серьезными финансовыми потерями [1]. Однако достоверный прогноз работоспособности и ресурса силовых трансформаторов до сих пор не возможен. Действительно, согласно статистическим данным [1, 2] основная доля их отказов вызвана старением базовой бумажно-пропитанной изоляции (БПИ). Ее состояние усугубляется не только нарастающими деструктивными явлениями под действием эксплуатационных факторов, но и динамическими нагрузками на целлюлозный материал при работе в режимах короткого замыкания [3]. Предсказать возникновение подобных ситуаций практически не возможно. Причем, хотя слабым компонентом БПИ является масло, за ресурс изоляции в большей степени отвечает электроизоляционная бумага (ЭИБ), так как масло можно заменить. В указанных условиях пристального внимания требует проблема совершенствования методов диагностики изоляции в процессе эксплуатации [4–6]. Однако до настоящего времени задача своевременного отключения СТ не решена по ряду причин, в числе которых — сложность мониторинга состояния целлюлозной бумаги (особенно с учетом возможности локального перегрева). Поэтому вполне очевидна необходимость

развития исследований, направленных на повышение природной сорбционной активности способствующей замедлению деструктивных явлений в изоляции [7, 8], и нагревостойкости целлюлозного компонента. Они должны базироваться на углубленном изучении механизма старения ЭИБ [9]. Но на сегодняшний день нет единого и обоснованного взгляда на химические и структурные особенности, предопределяющие возможность повышения работоспособности ЭИБ при длительной эксплуатации. Более того, признанные оптимальными характеристики электроизоляционной целлюлозы (в частности, значение исходной степени полимеризации (СП) ее макромолекул — $СП_0 = 1200$ ед.), а также недостаточно обоснованные критерии предела физического существования ЭИБ (критическое $СП_{кр} = 200$ ед. и снижение исходной механической прочности на 50 %) вызывают сомнения (что подтверждено наблюдениями практиков [10, 11]) и нуждаются в дополнительном исследовании.

Цель работы — изучение влияния средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы на работоспособность и механическую прочность ЭИБ при длительном воздействии теплового поля.

Подобного рода исследования — актуальная и практически полезная задача вследствие устаревших представлений об одной из важнейших характеристик целлюлозной бумаги — длительной нагревостойкости, во многом определяющей ресурс БПИ силовых трансформаторов.

Объект исследования. Изучались промышленные образцы трехслойной электроизоляционной бумаги марки толщиной 140 мкм, изготовленной из сульфатной небеленой целлюлозы

сосны с различной исходной средней степенью полимеризации макромолекул целлюлозы.

Методика измерений

Определение средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы (СП, ед.). Для определения СП вискозиметрическим методом применялся вискозиметр Убеллоде марки ВПЖ-3. Проводилось по три повторных измерения на точку.

Определение кратковременной электрической прочности ($E_{пр}$, кВ/мм) ЭИБ. Для оценки $E_{пр}$ (50 значений на точку) использовалась высоковольтная пробивная установка со скоростью подъема напряжения 3 кВ/с. Применялась электродная система: «шар» (диаметром 6 мм) — «плоскость» (диаметром 25 мм).

Определение механической прочности на разрыв (P_p , Н). Механическая прочность на разрыв образцов ЭИБ определялась с использованием: испытательного стенда (разрывная машина) серии ES, модель ESM301/ESM301L компании МАРК-10, рассчитанного на приложение силы при растяжении образца до 1,5 кН; разрывной машины Schorper.

Испытывались фрагменты (полосы) бумаги размером 60×15 мм по 10 образцов на точку.

Оценка нагревостойкости электроизоляционной бумаги. Анализировались зависимости P_p и СП от времени ускоренного термостарения при температуре 140 °С и свободном доступе воздуха; сопоставлялось время, за которое значения указанных характеристик исследуемых видов ЭИБ достигали принятых критических значений.

Микроскопический анализ состояния целлюлозных волокон и бумажного полотна. Микрофотографии отдельных целлюлозных волокон и полотна электроизоляционной бумаги (в среднем по 20 микрофотографий на точку) получали при помощи микроскопа «Analyt» и камеры «Celestron» (Digital microscope image), сопряженной с персональным компьютером. Также был использован сканирующий электронный микроскоп (SEM) SUPRA-55VP-25–78 (Zeiss).

Полученные результаты

Предварительно, с целью выбора объекта исследования, проводилась оценка (вискозиметрическим методом) исходной степени полиме-

ризации СП₀ макромолекул целлюлозы промышленных образцов ЭИБ, отобранных из различных рулонов материала. Она выявила отклонение значений характеристики от «оптимального» (1200 ед.) и их существенную вариацию (от 1890 ед. до 628 ед.), что совпадает с литературными сведениями. В частности, в публикации [10] приводятся данные по вариации значений исходной степени полимеризации макромолекул целлюлозы ЭИБ, использованной в силовых трансформаторах. Диапазон изменения СП₀, по данным авторов, составлял от 750 ед. до 1970 ед. В результате для проведения исследований мы выбрали образцы № 1 с СП₀₁ = 618 ед. (минимальная среди имеющихся вариантов) и № 2 с СП₀₂ = 1208 ед., который был принят за прототип, так как значение его исходной степени полимеризации близко к «оптимальному» (1200 ед.).

Первоначально была проведена оценка кратковременной электрической прочности исследуемых образцов ЭИБ в исходном состоянии (рис. 1), которая показала, что пониженная СП₀ макромолекул ЭИЦ не оказывает отрицательного влияния на данную характеристику

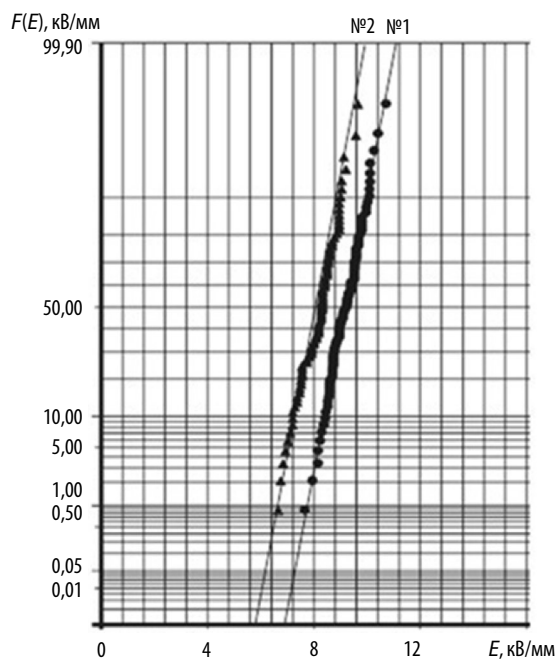


Рис. 1. Функции F нормального распределения $E_{пр}$ образцов ЭИБ: № 1 (СП₀₁ = 618 ед.) и № 2 (СП₀₂ = 1208 ед.)

Fig. 1. The function of the normal distribution of E_b of the samples of EIP № 1 (DP₀ = 618) and № 2 (DP₀ = 1208)

бумаги, а именно: значения $E_{пр\ ср}$ ЭИБ № 1 ($СП_{01} = 618$ ед.) и № 2 ($СП_{02} = 1208$ ед.) составили соответственно $(8,9 \pm 0,3)$ и $(8,3 \pm 0,4)$ кВ/мм.

Далее была проведена проверка возможного влияния скорости приложения нагрузки v , мм/мин, и длины разрывного промежутка образца h , мм, (которая варьировалась от 0 до 120 мм) на значение механической прочности на разрыв P_p , Н. Она не выявила четкой взаимосвязи указанных параметров. Поэтому при дальнейших исследованиях были приняты следующие значения указанных характеристик: $v = 7$ мм/мин; $h = 10$ мм. В этом случае средние значения P_p образцов ЭИБ в исходном состоянии составили: для № 1—258 Н; для № 2—152 Н, то есть бумага с пониженным значением $СП_0$ отличалась повышенной (в среднем в 1,7 раза) механической прочностью.

С целью сравнительной оценки нагревостойкости исследуемых вариантов ЭИБ было проведено ускоренное термостарение фрагментов (полос) материала (№ 1 и № 2) при температуре 140 °С, в ходе которого отбирались пробы для определения P_p и СП. Как отмечалось, при оценке нагревостойкости ЭИБ за критериальный параметр по СП, то есть за критическое значение

характеристики, соответствующее пределу физического существования бумаги, принято $СП_{кр} = 200$ ед. Поэтому термостарение проводилось до тех пор, пока данная характеристика хотя бы одной из бумаг не достигнет указанного уровня. На рис. 2 приведены зависимости СП от времени термостарения τ для обоих вариантов ЭИБ. Видно, что через 300 часов термовоздействия на ЭИБ № 2 СП составила 199 ед., т. е. достигла критического значения (и снизилась за это время в 4 раза от исходного значения), тогда как к указанному моменту старения значение ЭИБ № 1 СП составило 376 ед. (то есть снизилось в 1,4 раза). Таким образом, в результате данного исследования было выявлено, что снижение средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы (а следовательно, и разрушение бумаги в ходе термостарения) замедлено для ЭИБ с пониженной $СП_0$. Возможность подобного эффекта отмечается в публикации [10]. Однако авторы указанной работы предполагают, что приведенный факт случаен, и объясняют его технологическими особенностями получения ЭИЦ. Для развития представлений о причинах явления нами была проведена оценка нагревостойкости образцов ЭИБ на основе определения P_p .

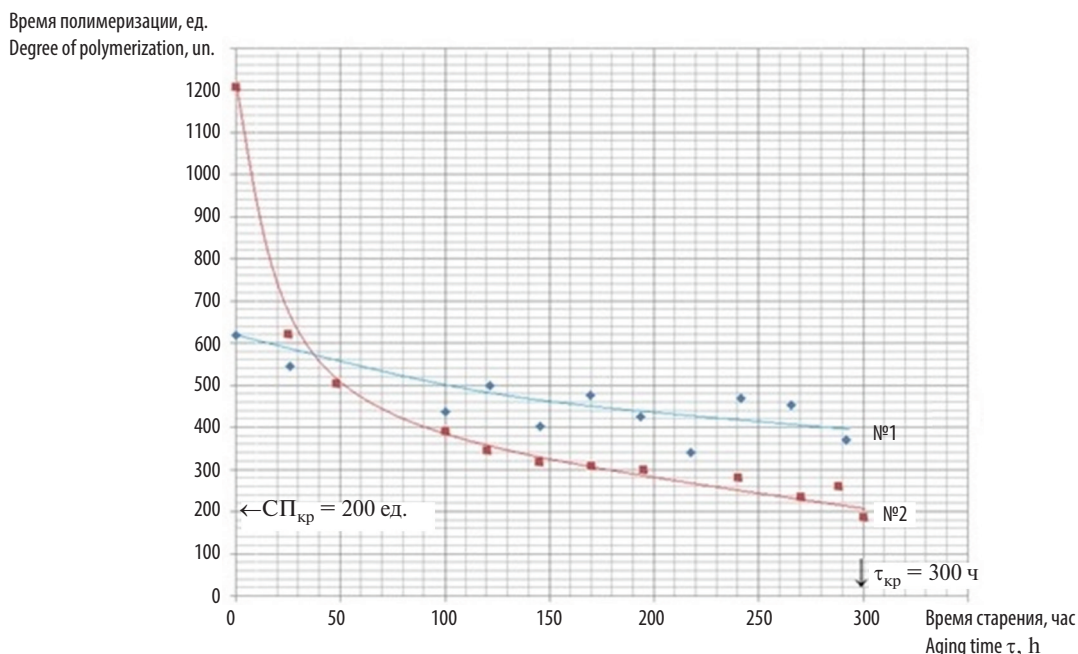


Рис. 2. Зависимости СП от времени термостарения образцов ЭИБ

Fig. 2. Dependence of the degree of polymerization on the aging time of EIP samples

Механическая прочность на разрыв исследуемых образцов ЭИБ определялась в процессе ускоренного термостарения при температуре 140 °С и свободном доступе воздуха. Получены следующие значения $P_{p\text{ ср}}$ в процессе термостарения:

ЭИБ № 1 (СП₀ = 618 ед.)

τ, час	$P_{p\text{ ср}}, \text{ Н}$
0	257,7
26	253,8
48	225,4
100	184,2
121,5	169,5
169,5	175,4
193,5	173,5
217,5	186,6
241,5	159,7
265,5	160,7
292,5	151,9
310	137,2
319	136,0
355	152,3
377	131,3
$\tau_{50\%} = 403,5$	131,7
432,5	97,0
474,5	103,9

ЭИБ № 2 (СП₀ = 1208 ед.)

τ, час	$P_{p\text{ ср}}, \text{ Н}$
0	152
25	126
48	119
100	116
120	97
170	86
195	80
$\tau_{50\%} = 215$	73
240	63
300	58

При анализе полученных результатов сопоставлялось время снижения исходной механической прочности бумаги в два раза — $\tau_{50\%}$, поскольку, как отмечалось, уменьшение разрушающего разрывного усилия вдвое считается критическим показателем существования ЭИБ.

Было установлено, что $\tau_{50\%}$ для образца № 2 составляет 215 часов, что в среднем в 1,8 раза меньше, чем для образца № 1 с пониженной СП₀ ($\tau_{50\%} \approx 403$ ч). Это, на наш взгляд, подтверждает повышенную устойчивость к длительному термовоздействию бумаги с пониженной СП₀ (по сравнению с «оптимальным» значением

характеристики в 1200 ед.). Кроме того, представленные результаты продемонстрировали несоответствие момента достижения параметрами СП (300 ч) и P_p (215 ч) критических значений, то есть взаимосвязь критериальных характеристик по СП₂₀₀ и $P_{p\ 50\%}$ — не однозначна.

Анализ результатов

С целью выявления гипотетических причин расхождений, имевших место в случае образца № 2 (достигшего «предела физического существования» по параметрам СП₂₀₀ и $P_{p\ 50\%}$ за разные промежутки времени), был проведен расчет P_p исходя из экспериментальных значений СП. Он выполнен на базе представлений, изложенных в работе [10], с использованием выражения

$$P = P_0 \exp \left[-l \left(\frac{1}{\text{СП}} - \frac{1}{\text{СП}_0} \right) \right], \quad (1)$$

где $l = 380$ [12] — число звеньев в сегменте сетчатой модели целлюлозной бумаги. Выявилось существенное расхождение экспериментальных и расчетных значений механической прочности на разрыв. На момент, когда СП_{эксп} для ЭИБ № 2 достигла критического значения в 200 ед., расхождение ($P_{p\text{ эксп}} = 58$ Н и $P_{p\text{ расч}} = 31$ Н) составило 87 %. Причем, указанное экспериментальное значение характеристики оказалось на 20 % ниже критического (73 Н) по параметру $P_{p\ 50\%}$ для данной бумаги. Следует отметить, что расхождение расчетных и экспериментальных значений для начальных моментов старения существенно ниже; на это указывалось и в работе [12].

Для уточнения причин полученных результатов нами был проведен анализ структурных изменений фрагментов ЭИБ № 1 после 474,5 часов термостарения (то есть на момент окончания испытаний) на основе микрофотографий, выполненных при помощи SEM, две из которых в качестве примера представлены на рис. 3. Исходная механическая прочность бумаги к этому времени снизилась на 60 %, то есть материал достиг «предела физического состояния» по параметру $P_{p\ 50\%}$. На наш взгляд, приведенные кадры позволяют утверждать, что механическое воздействие приводит к разрушению ЭИБ с образованием внутренних трещин, развитие которых нельзя объяснить только снижением СП

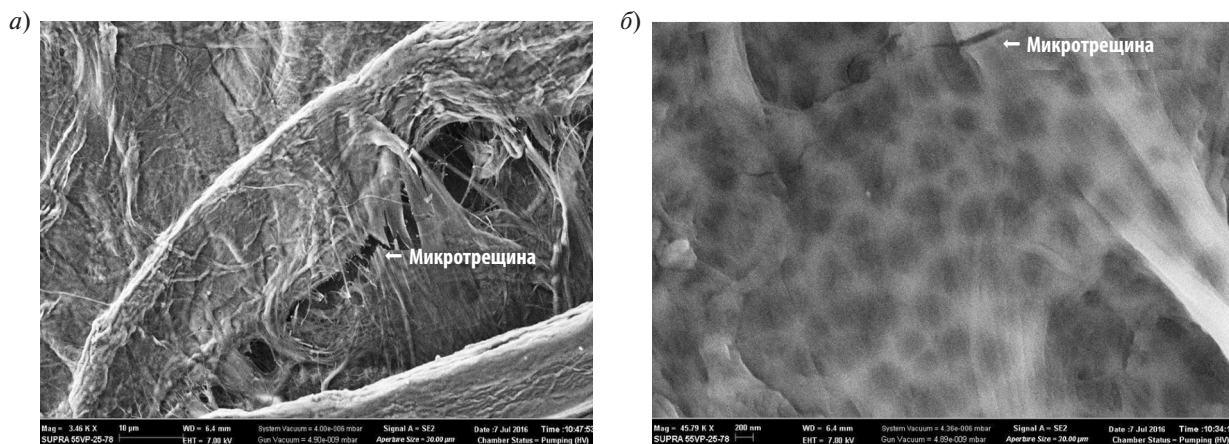


Рис. 3. Микрофотографии фрагмента ЭИБ № 1 после 474,5 ч термостарения, полученные на SUPRA-55VP-25–78 (Zeiss) с увеличением: *a* — $\times 3,46$ К; *б* — $\times 45,79$ К

Fig. 3. Microphotographs of the EIP fragment No. 1 after 474.5 hours of thermal aging, obtained with SUPRA-55VP-25–78 (Zeiss): *a* — $\times 3,46$ К; *б* — $\times 45,79$ К

макромолекул целлюлозы. Действительно, на результат определения P_p несомненно влияет кристалло-аморфное фазовое состояние целлюлозных волокон (наличие участков, прочность которых определяется «проходными» цепями). Влияет и так называемая «облачность» ЭИБ, то есть распределение зон различной плотности по

плотную бумагу, а соответственно, и по площади фрагментов (полос) материала, которые испытываются на разрыв. На рис. 4 приведены микрофотографии области разрыва двух полос (1 и 2) ЭИБ № 1 после 355 часов термостарения, которые были отобраны на основе их (визуально) повышенной (1) и пониженной (2) «облачности».

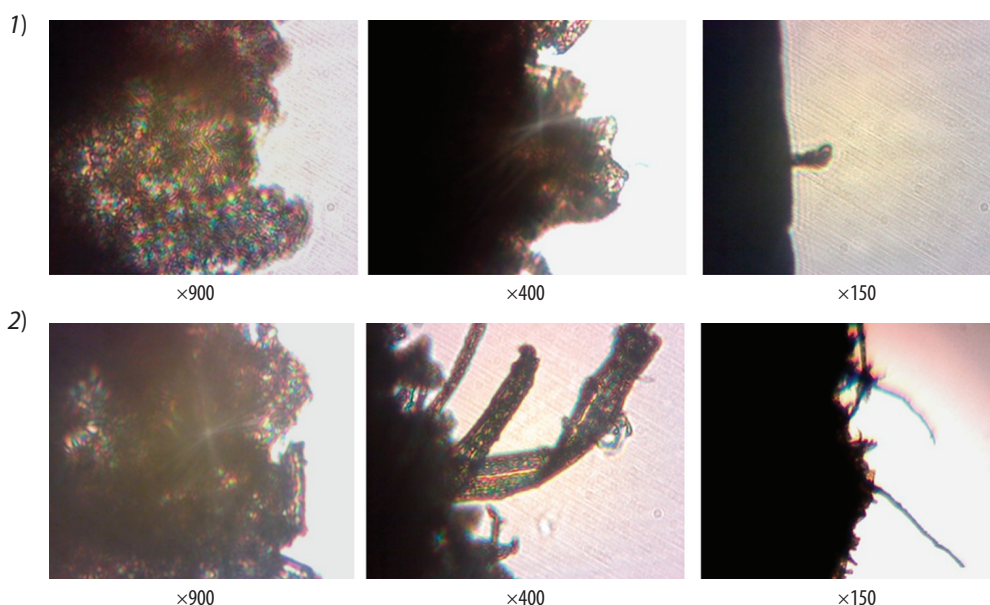


Рис. 4. Микрофотографии области разрушения двух полос (1 и 2) ЭИБ № 1 после 355 ч термостарения, полученные с помощью микроскопа «Analyt» и камеры «Celestron» (Digital microscope image)

Fig. 4. Microphotographs of the destruction's area of two bands (1, 2) of EIP № 1. obtained with microscope «Analyt» and microscope digital camera «Celestron»

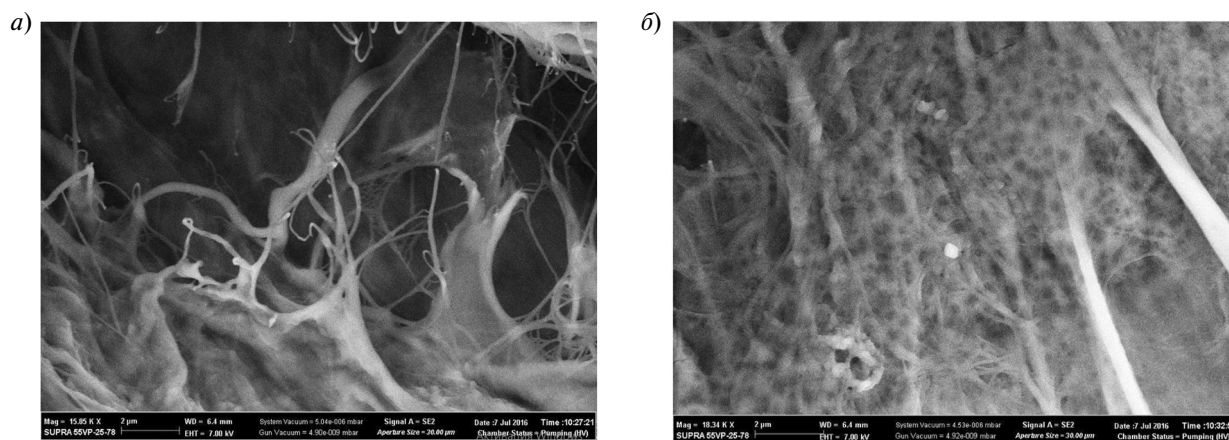


Рис. 5. Микрофотографии соседних участков одного и того же фрагмента ЭИБ после 474 часов термо-старения, полученные на SUPRA-55VP-25–78 (Zeiss) с увеличением: *a* — $\times 15,85$ К; *б* — $\times 18,34$ К

Fig. 5. Microphotographs of the adjacent areas of EIP fragment after 474 hours of thermal aging, obtained with SUPRA-55VP-25–78 (Zeiss): *a* — $\times 15,85$ К; *б* — $\times 18,34$ К

Значения P_p данных фрагментов ЭИБ — соответственно 122 и 196 Н. По-видимому, в первом случае деструкция развивается более интенсивно вследствие наличия ослабленных структурных зон, которые могут в ряде случаев распространяться поперек всей полосы ЭИБ и, несомненно, сказываются на результате испытаний. Более того, соседние области одной и той же полосы бумаги (визуально не имеющей значительной «облачности») закономерно имеют существенные морфологические особенности, что подтверждают микрофотографии, представленные на рис. 5.

Приведенные факты, на наш взгляд, подтверждают отсутствие прямой корреляции механической прочности бумаги с СП макромолекул целлюлозы, а также недостаточную обоснованность использования принятых критериальных характеристик предела физического состояния целлюлозного материала для оценки работоспособности ЭИБ. Однако именно $СП_{кр} = 200$ ед. принято в качестве критического значения СП в следующем выражении, определяющем ресурс БПИ (СИГРЭ [11]):

$$\text{Ресурс БПИ} = \frac{(1/200 - 1 / СП_0) \exp[13350 / (v + 273)]}{8760 A}, \quad (2)$$

где 200 — это $СП_{кр}$; $СП_0$ — исходная степень полимеризации макромолекул целлюлозы; v —

температура наиболее нагретой точки изоляции; A — показатель скорости старения, зависящий от влагосодержания, наличия кислот и кислорода; 13350 и 8760 — коэффициенты, полученные по итогам статистической обработки многолетних наблюдений старения изоляции.

Согласно [14] критическим значением по МЭК считается СП = 300 ед.

В то же время практики констатируют возможность эксплуатации силовых трансформаторов еще в течение нескольких лет после достижения СП значения в 200 ед. [6, 10, 11]. Необходимо отметить известный факт: при низких значениях СП целлюлоза не вступает в ряд химических реакций [15, 16]. Этим, в частности, можно объяснить и повышенную термостабильность ЭИБ с пониженной $СП_0$, продемонстрированную нашими испытаниями.

Заключение

Основным результатом представленной работы можно считать вывод о повышенной работоспособности ЭИБ с низкой исходной степенью полимеризации макромолекул целлюлозы, что представляет практический интерес с точки зрения увеличения ресурса БПИ. Необходимо развивать исследования данного направления для оптимизации $СП_0$ ЭИЦ с учетом полученной дополнительной информации.

Представленные сведения подтверждают необоснованность принятых критериев предела физического состояния электроизоляционной

бумаги (ресурс которой во многом определяет работоспособность СТ) и необходимость их в корректировки, а также указывают на необходимость развития работ по структурной моди-

фикации целлюлозной основы ЭИБ с целью обеспечения устойчивости материала к механическим нагрузкам при длительном термовоздействии в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лоханин А.К.** Краткие обзоры докладов 43 сессии СИГРЭ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. № 3. С. 80–87.
2. **Анчарова Т.В.** Повышение эксплуатационной надежности трансформаторов, отработавших нормативный срок службы // Главный энергетик. 2009. № 1. С. 36–41.
3. **Гунн И.Г. [и др.].** Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 102–105.
4. **Dolin A.P., Pershina N.F., Smekalov V.V.** Condition assessment and life time extension of // Proceedings of CIGRE Session 39 CIGRE. 2002. 7 p.
5. **Zhuravleva N.M. [et al.].** The study of thermal aging components paper-impregnated insulation of power transformers // Proceedings of conference EIConRusNW 2016. 2016. P. 782–786.
6. **Mirzaie M. [et al.].** Insulation condition assessment of power transformers using accelerated ageing test // Turk J Elec Eng & Comp Sci. 2009. Vol. 17. № 1. P. 39–54.
7. **Zhuravleva N.M. [et al.].** On the increasing of the sorption capacity and temperature resistance of cellulosic insulation dielectrics // Proceedings of conference ELEKTRO 2016. 2016. P. 649 653.
8. **Патент № 2415221 Российской Федерации.** Способ получения электроизоляционной бумаги / Н.М. Журавлева, Б.И. Сажин, Е.Г. Смирнова, А.К. Хрипунов, А.А. Ткаченко; патентообладатель — учреждение Академии наук Институт высокомолекулярных соединений РАН. № 2010117529/12; заявл. 30.04.2010; опубл. 27.03.2011. Бюл. № 9.
9. **Taghikhani M.A.** Power transformer insulation lifetime estimation methods // International Journal of Energy Engineering. 2011. № 1(1). P. 9–11.
10. **Львов М.Ю. [и др.].** Старение целлюлозной изоляции обмоток силовых трансформаторов // Электрические станции. 2004. № 10. С.11–15.
11. Трансформаторы с низкой степенью полимеризации бумаги [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.silovoytransformator.ru>.
12. **Маслякова А.В.** Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика путем его модификации хитозаном: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02/ Маслякова Анна Вячеславовна. СПб., 2005. 204 с.
13. **Васин В.П., Долин А.П.** Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Электро. 2008. № 3. С. 12–17.
14. **Осотов В.Н.** Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов // Доклад на III Научно-практической конференции «Контроль технического состояния и оборудования объектов энергетики». Москва, ВВЦ. 2016.
15. **Duval M., De Pablo A.** Significance and detection of very low degree of polymerization of paper in transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2017. Vol. 33, Iss. 1, P. 31–38.
16. Cellulose Chemistry and its applications / Eds. Nevell T.P., Zeronian S.H. Halsted (Wiley). New York, 1985. 552 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РЕЗНИК Александр Сергеевич — инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: alexreznik85@gmail.com

ЖУРАВЛЕВА Наталия Михайловна — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Natalia_Zhurav@mail.ru

КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович — доктор физико-математических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

ТАШЛАНОВ Дмитрий Олегович — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: tashlanov1993@mail.ru



REFERENCES

1. **Lokhanin A.K.** Kratkiye obzory dokladov 43 sessii SIGRE. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2010. № 3. S. 80–87. (rus.)
2. **Ancharova T.V.** Povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti transformatorov, otrabotavshikh normativnyy srok sluzhby. *Glavnyy energetik*. 2009. № 1. S. 36–41. (rus.)
3. **Gunn I.G. [i dr.]**. Osnovnyye neispravnosti i metody diagnostirovaniya silovykh transformatorov v uslovii ekspluatatsii. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2012. № 1. S. 102–105.
4. **Dolin A.P., Pershina N.F., Smekalov V.V.** Condition assessment and life time extension of. *Proceedings of CIGRE Session 39 CIGRE*. 2002. 7 p.
5. **Zhuravleva N.M. [et al.]**. The study of thermal aging components paper-impregnated insulation of power transformers. *Proceedings of conference EIconRusNW 2016*. 2016. P. 782–786.
6. **Mirzaie M. [et al.]**. Insulation condition assessment of power transformers using accelerated ageing test. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*. 2009. Vol. 17. № 1. P. 39–54.
7. **Zhuravleva N.M. [et al.]**. On the increasing of the sorption capacity and temperature resistance of cellulosic insulation dielectrics. *Proceedings of conference ELEKTRO 2016*. 2016. P. 649–653.
8. **Patent № 2415221 Rossiyskaya Federatsiya**. Spособ polucheniya elektroizolyatsionnoy bumagi / N.M. Zhuravleva, B.I. Sazhin, Ye.G. Smirnova, A.K. Khripunov, A.A. Tkachenko; patentoobladatel — ucherezhdeniye Akademii nauk Institut vysokomolekulyarnykh soyedineniy RAN. № 2010117529/12; zayavl. 30.04.2010; opubl. 27.03.2011, Byul. № 9. (rus.)
9. **Taghikhani M.A.** Power transformer insulation life-time estimation methods. *International Journal of Energy Engineering*. 2011. № 1(1). P. 9–11.
10. **Lvov M.Yu. [i dr.]**. Stareniye tsellyuloznoy izolyatsii obmotok silovykh transformatorov. *Elektricheskiye stantsii*. 2004. № 10. S. 11–15. (rus.)
11. Transformatory s nizkoy stepenyu polimerizatsii bumagi [Elektronnyy resurs] / Rezhim dostupa: <http://www.silovoytransformator.ru>. (rus.)
12. **Maslyakova A.V.** Povysheniye elektrofizicheskikh kharakteristik i ustoychivosti k termostareniyu tsellyulozosoderzhashchego dielektrika putem yego modifikatsii khitozonom: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.02/ Maclyakova Anna Vyacheslavovna. SPb., 2005. 204 s.
13. **Vasin V.P., Dolin A.P.** Resurs izolyatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov. *Elektro*. 2008. № 3. S. 12–17. (rus.)
14. **Osotov V.N.** Prakticheskiye aspekty otsenki fakticheskogo sroka sluzhby silovykh transformatorov. *Doklad na III Nauchno-prakticheskoy konferentsii «Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya i oborudovaniya obyektov energetiki»*. Moskva, VVTs, 2016 g. (rus.)
15. **Duval M., De Pablo A.** Significance and detection of very low degree of polymerization of paper in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017. Vol. 33. Iss. 1. P. 31–38.
16. Cellulose Chemistry and its applications / Eds. T.P. Nevell, S.H. Zeronian/ Halsted (Wiley). New York, 1985. 552 p.

AUTHORS

REZNIK Aleksandr S. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: alexreznik85@gmail.com

ZHURAVLEVA Nataliia M. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Natalia_Zhurav@mail.ru

KIESEWETTER Dmitrii V. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

TASHLANOV Dmitrii O. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: tashlanov1993@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.03.2017.