

УДК 676.2+620.3

ЯКИМЕНКО О. С., БАРБАШ В. А.*, ЯЩЕНКО О. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ІЗ РІЗНОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОГО ПАПЕРУ

Стаття присвячена дослідженням впливу наноцелюлози (НЦ) із різної рослинної сировини – волокон конопель (ВК) і хвойної деревини (ХД) на показники якості електроізоляційного паперу. Встановлено, що витрата НЦ від 1% до 5% від маси паперу позитивно впливають на показники його якості, що сприяє вирішенню технологічних питань щодо досягнення вимог стандартів. Доведено зростання механічної і електричної міцності паперу та збереження їх значень після проведення термічного старіння. Показано, що введення НЦ у композицію маси призводить до незначного зростання тангенсу кута діелектричних втрат електроізоляційного паперу та його зростання в процесі термічного старіння паперу. Встановлено, що вплив НЦ із ВК на показники якості електроізоляційного паперу не поступається дії на них НЦ із ХД. Підтверджено суттєве збільшення значень діелектричної проникності та незначне зростання рН і зниження електропровідності водної витяжки паперу з додаванням НЦ у волокнисту масу. Показано, що введення НЦ у композицію паперу практично не знижує його ступінь полімеризації, що має практичне значення для підтримання високої надійності та довгої тривалості роботи паперової ізоляції.

Ключові слова: наноцелюлоза, електроізоляційний папір, показники якості, механічна і електрична міцність, екологічність, ресурсоефективність

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307366

*Corresponding author: v.barbash@kpi.ua

Received 03 June 2024; Accepted 19 June 2024

Постановка проблеми. Останнім часом в електротехніці та електроніці велика увага приділяється питомим характеристикам складових таких приладів, як трансформатори і конденсатори, в яких використовується електроізоляційний папір. Його частка в масі трансформаторів та силових конденсаторів становить до 15%, а для силових кабелів – до 20% [1,2]. Збільшення питомих характеристик таких виробів можлива за рахунок покращення електроізоляційних характеристик паперу, використанню спеціальних просочувальних олиф, використанню інших спеціальних конструктивних матеріалів. Такі електротехнічні прилади поряд із генератором є фундаментом енергетики, а електроізоляційний папір в них виконує одну із головних функцій, і тому покращення показників якості та технології виробництва електроізоляційного паперу є актуальною науково-практичною задачею.

Одним із перспективних матеріалів, що активно досліджується в останні десятиріччя і дозволяє покращити показники якості картонно-паперової продукції, є наноцелюлоза (НЦ) [3–5]. Вона має унікальні властивості і підвищує, зокрема, щільність, розривну довжину, опір продавлюванню, міцність на злом під час багаторазових перегинів, водо- та жиронепроникність паперу і картону, дозволяє зменшити витрати шкідливих синтетичних хімічних допоміжних речовин (ХДР) і дороговартісних видів целюлози [6].

Аналіз попередніх досліджень. Електроізоляційний папір характеризується набагато ширшим переліком показників якості у порівнянні з іншими традиційними видами паперу. Цей перелік показників включає такі спеціальні електроізоляційні характеристики, як: електрична міцність, тангенс кута діелектричних втрат, діелектрична проникність, ступінь полімеризації, термічне та електричне старіння електроізоляції. Для досягнення необхідних значень показників якості електроізоляційного паперу використовуються різні ХДР, зокрема і наноцелюлоза. В роботах [7,8] показано, позитивний вплив НЦ на електричну та механічну міцності паперу з використанням НЦ із деревини. На жаль, в літературі практично відсутні результати досліджень, присвячених впливу витрат НЦ із недеревної рослинної сировини на характеристики електроізоляційного паперу. При цьому відомі дані про використання НЦ із недеревної рослинної сировини для покращення показників якості інших видів паперу та картону [9,10]. Попередні наші результати показали можливість отримання НЦ із стебел злакових і волокон технічних культур та її використання для покращення показників

якості різних видів картонно-паперової продукції [11]. Але невирішеною частиною науково-практичної проблеми залишається відсутність даних про одержання та використання nanoцелюлози із недеревної рослинної сировини та із деревини на широкий спектр показників якості електроізоляційного паперу.

Метою статті є висвітлення результатів досліджень впливу НЦ із волокон конопель (ВК) і хвойної деревини (ХД) на цільові показники якості електроізоляційного паперу. Для досягнення вказаної мети поставлено **наступні завдання**:

- одержати із волокон конопель органосольвентним способом целюлозу, придатну для одержання з неї НЦ методом кислотного гідролізу;
- одержати НЦ методом кислотного гідролізу сульфатної невивіленої хвойної целюлози, яка використовується у виробництві електроізоляційного паперу;
- виготовити лабораторні відливи електроізоляційного паперу з додаванням і без додавання у волокнисту масу НЦ із ВК і ХД;
- визначити показники якості одержаних зразків паперу та провести їх порівняльний аналіз.

Об'єкти та методи дослідження

Проведений хімічний аналіз вихідної рослинної сировини – волокон конопель (ВК) – показав, що вони містять більше 70 % целюлози, що суттєво більше ніж у хвойній та листяній деревині (40–50 %). Вміст лігніну у ВК (6,5 %) у 3–4 рази менший, ніж у деревині [12]. При цьому зольність у ВК (1,5 %) майже у 8 рази більша, ніж у деревині, однак як показали попередні дослідження [13], ВК придатні для одержання целюлози і НЦ. Одержання із ВК целюлози проводили екологічно безпечним органосольвентним способом делігніфікації за методикою, наведеної в роботі [14]. Для екстракції НЦ проводили процес гідролізу органосольвентної конопляної і сульфатної невивіленої хвойної целюлози 50%-ним розчином сульфатної кислоти за гідромодуля 10 : 1 та температури 60 °С упродовж 90 хвилин згідно з методикою, описаною в роботі [15]. Одержані стабільні прозорі гелі НЦ із ВК і ХД зберігали в герметичних ємностях для подальшого використання у волокнистій композиції електроізоляційного паперу.

Для виготовлення лабораторних зразків електроізоляційного паперу використовували сульфатну невивілену хвойну целюлозу, яку розпускали і розмелювали у лабораторному розмелювальному комплексі ЛРК (Україна) для забезпечення однорідності волокнистої суспензії та досягнення ступеня млива 50 °ШР. Відливи паперу масою 65 ± 3 г/м² і товщиною 100 ± 5 мкм одержували на листовідливному апараті ЛА-1 (Україна) за стандартною методикою. Ідентичні відливи були виготовлені з додаванням у волокнисту композицію 1 %, 2 %, 3 % і 5 % НЦ із ВК і ХД від маси паперу. Випробувані на цільові показники якості отриманих зразків електроізоляційного паперу досліджували відповідно вимог стандарту [16].

Результати та їх обговорення

До основних механічних показників паперу відносяться руйнівне зусилля та відносне видовження. Вплив введення різних видів НЦ у композицію маси для багатьох видів паперу показав збільшення значень цих показників механічної міцності [6]. При цьому абсолютні значення цього зростання в кожному випадку були різними, що дозволяє визначити наступні основні фактори впливу НЦ на показники паперу [11]:

- вид целюлози, як основного компоненту паперової маси (із хвойної або листяної деревини, або з різних представників недеревної рослинної сировини);
- параметри маси (ступінь млива, довжина волокна, температура, тощо);
- наявність в композиції маси ХДР (для вибілювання, проклейки, надання гідрофобності, тощо);
- вид НЦ, що вводиться в композицію (з хвойної або листяної деревини, або із недеревної рослинної сировини), та тип НЦ (нанofібрильована, нанокристалічна, бактеріальна).

Вплив НЦ із різної рослинної сировини (ВК і ХД) на показники механічної міцності електроізоляційного паперу наведено на рис. 1. Як видно із наведених на рис. 1 даних, значення руйнівного зусилля і відносного видовження електроізоляційного паперу суттєво зростають (до 30 % і 100 %, відповідно, за витрат 5 % НЦ від маси паперу) із збільшенням витрат НЦ у композицію маси паперу. Такі залежності спостерігалися в попередніх наших дослідженнях [13,15]. При цьому потрібно відзначити, що за однакової витрати НЦ значення показників механічної міцності паперу є більшими на 2,5–3,0 % для НЦ із ХД, що є на рівні статистичної похибки. Для підтримання стабільних характеристик електротехнічних приладів в часі важливо дослідити вплив термічного старіння електроізоляційного паперу з додаванням в його волокнисту композицію nanoцелюлози. Впливу термічного старіння на целюлозний матеріал, зокрема на

електроізоляційний папір, присвячено низка досліджень, наприклад [18,19], але в літературі практично відсутні дані щодо впливу НЦ на цей показник.

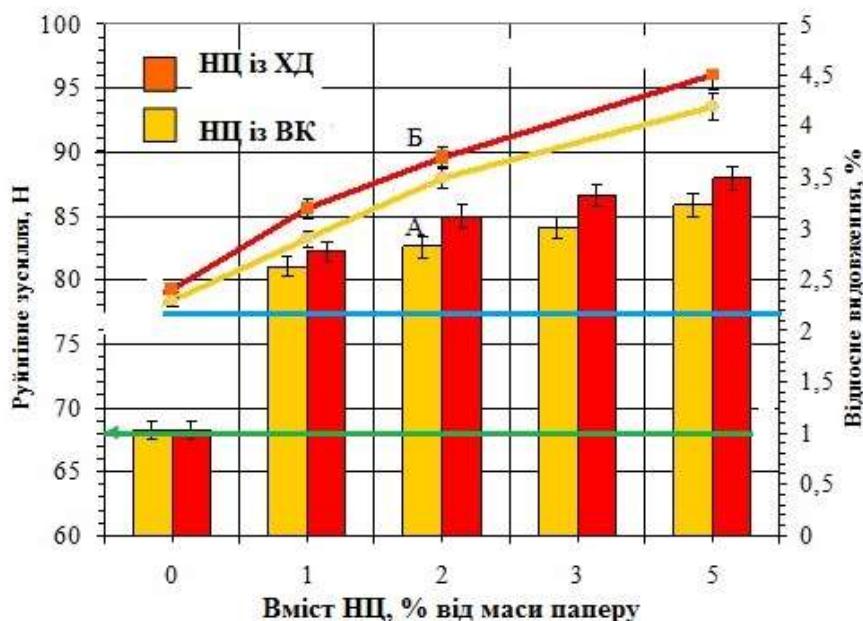


Рис. 1 – Залежність руйнівного зусилля (А) та відносного видовження (Б) паперу від вмісту НЦ із ВК і ХД. Горизонтальні лінії – вимоги стандарту [16]

В роботі термічне старіння зразків електроізоляційного паперу досліджувалося впродовж 4-х діб за температури 150 °С у відповідності із стандартом [20]. Такі умови відповідають значенням показників, які були б отримані за експлуатації зразків паперу впродовж 20 000 годин (близько 2,3 роки) за робочої температури 90 °С. Результати досліджень механічних показників якості паперу на термічне старіння наведено на рис. 2.

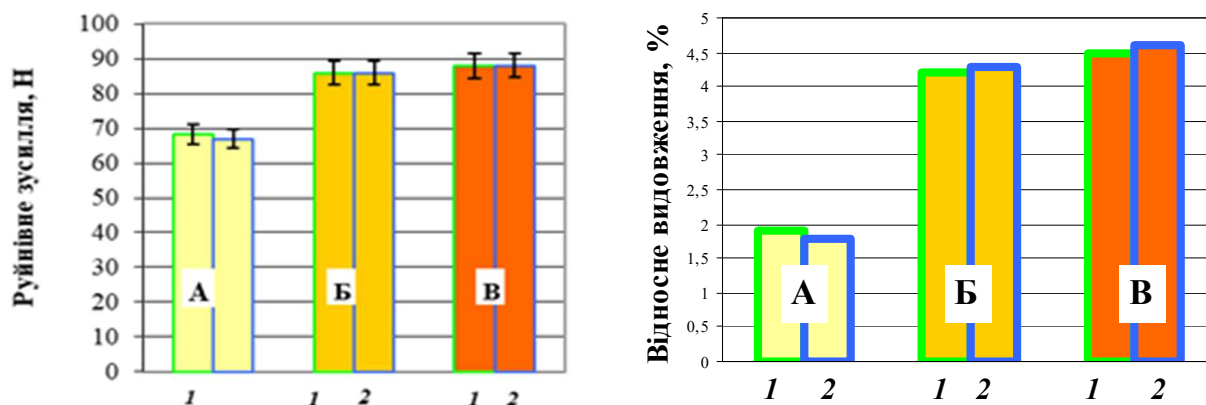


Рис. 2 – Руйнівне зусилля та відносне видовження паперу без вмісту НЦ (А) та за витрати НЦ 5% із ВК (Б) і ХД (В) до (1) та після (2) термічного старіння

Як видно з рис. 2, механічні показники як для вихідного паперу (без НЦ) так і з додаванням НЦ не зазнали суттєвих змін. Для вихідного паперу після термічного старіння спостерігається незначне зменшення величин руйнівного зусилля та відносного видовження (до 2%). Цього можна було очікувати, оскільки в основі

структури паперу є якісна невібілена хвойна сульфатна целюлоза. Введення в композицію маси НЦ обох видів не тільки покращило вихідні значення, але і, що дуже суттєво, повністю заблокувало процес старіння. При цьому варто звернути увагу на те, що значення механічних показників після старіння виявились навіть більшим, ніж до старіння, в особливості для показника відносного видовження. Така залежність пояснюється тим, що нагрів паперу є сприяв видаленню адсорбованої вологи та утворенню додаткових водневих зв'язків між гідроксильними групами целюлозних волокон і НЦ, що і призвело до зростання механічної міцності паперу.

Як відомо, на процес термічного старіння целюлозовмісних матеріалів впливає показник їх рН. Зокрема, в роботі [21] наводяться дані про суттєве прискорення процесу старіння целюлозного матеріалу зі зниженням рН. Результати дослідження впливу НЦ на показник рН водної витяжки електроізоляційного паперу наведено на рис. 3.

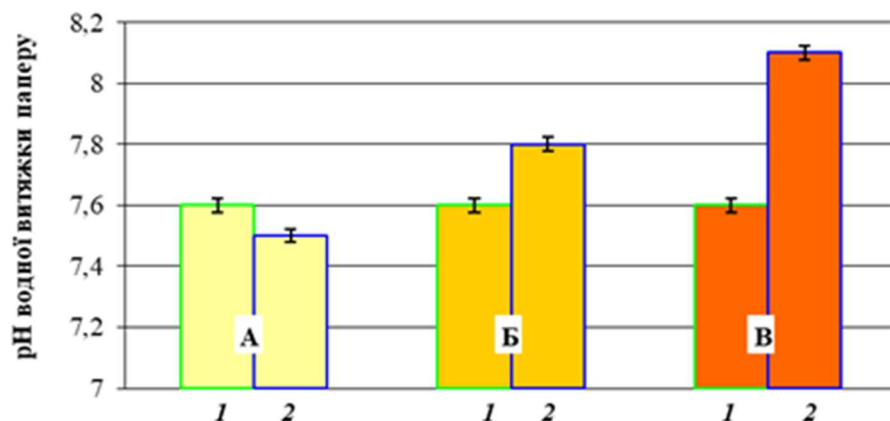


Рис. 3 – Залежність рН водної витяжки паперу без вмісту НЦ (А) та за витрати НЦ 5 % із ВК (Б) і ХД (В) до (1) та після (2) термічного старіння

Як видно з даних рис. 3, зростання рН після старіння для НЦ із ХД виявилось дещо більшим, ніж для НЦ із ВК – на 0,5 та 0,2 одиниць, відповідно. Підвищення рівня рН водної витяжки паперу, що спостерігається з додаванням НЦ в його композицію, позитивно вплинуло на стабілізацію механічної міцності паперу в часі і навіть призвело до невеликого її зростання після термічного старіння, що підтверджується наведеними на рис. 2 даними.

До механічних характеристик електроізоляційного паперу, що регламентуються стандартом, відноситься показник «Число подвійних перегинів», залежність якого від вмісту НЦ і термічного старіння наведено на рис. 4. Із даних на рис. 4а видно, що введення в композицію маси паперу НЦ обох видів (із ВК і ХД) має позитивний вплив на збільшення значень числа подвійних перегинів паперу. При цьому спостерігається збільшення значень показника «Число подвійних перегинів» на 21,5 % і 16,5 % для зразків паперу із витратою 5 % НЦ із ВК і НЦ із ХД, відповідно, у порівнянні із зразками без додавання НЦ. Оскільки основним чинником цього показника є пластичність целюлози, цілком природно припустити, що конопляна НЦ є більш пластична, ніж наночастинки із хвойної деревини.

На рис. 4б показано зміну величини показника «Число подвійних перегинів» у процесі термічного старіння паперу. При цьому спостерігається суттєве покращення (збільшення) значення показника з додаванням в його композицію НЦ, як це було показано раніше для показника відносного видовження паперу при введенні НЦ із ВК і ХД.

Таким чином, можна стверджувати, що введення НЦ в композицію маси електроізоляційного паперу дає суттєве покращення (підвищення) його механічних характеристик, при цьому при термічному старінні ці показники не погіршуються, а в деяких випадках навіть покращуються. Важливо також відзначити, що дія НЦ із волокон конопель практично не поступається дії НЦ із невібіленої хвойної сульфатної целюлози – найбільш спорідненої до головної складової композиції маси, що має найкращі властивості для відливу електроізоляційного паперу. Це підтверджує вихідну гіпотезу про можливість використання НЦ із конопляних волокон у волокнистій композиції електроізоляційного паперу.

В роботі також досліджено вплив НЦ із різної рослинної сировини на електроізоляційні показники якості паперу. Одним із головних цільових показників якості електроізоляційного паперу є електрична міцність. Результати дослідження впливу витрат НЦ із ВК і ХД та термічного старіння на цю електроізоляційну характеристику паперу наведено на рис. 5.

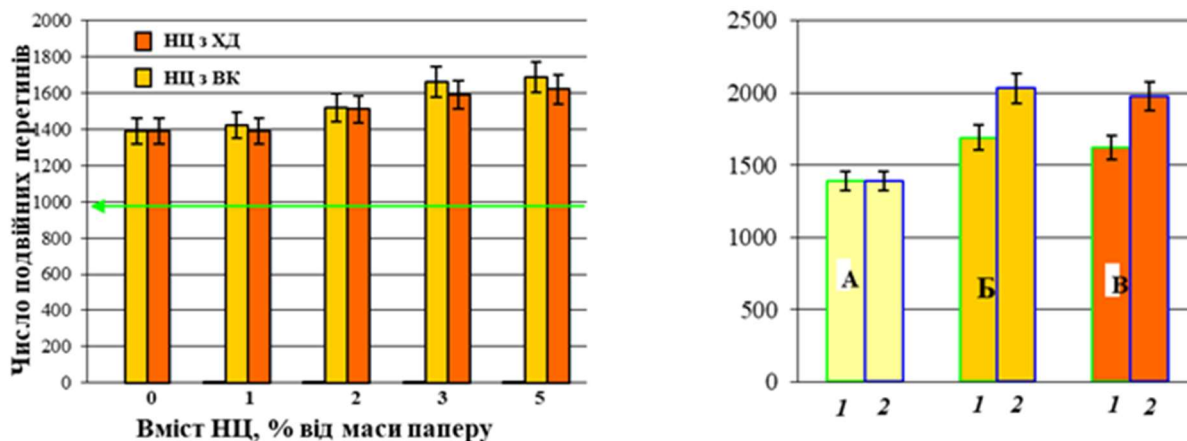


Рис. 4 – Залежність числа подвійних перегинів паперу від вмісту НЦ (а) і термічного старіння (б) для зразків паперу без вмісту НЦ (А) та із вмістом НЦ 5% із ВК (Б) і ХД (В) до (1) та після (2) старіння

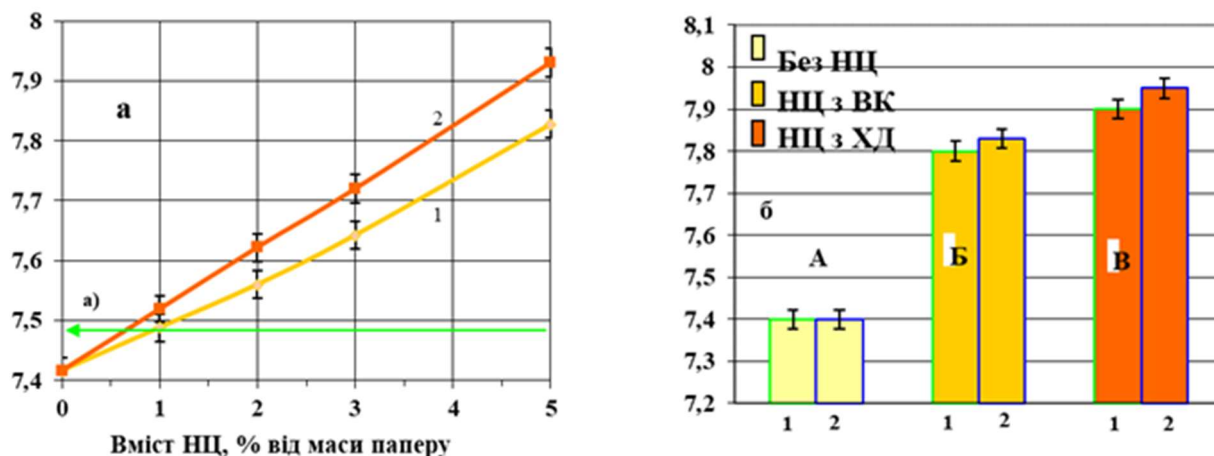


Рис. 5 – Залежність електричної міцності (кВ/мм) паперу від вмісту НЦ (а) із ВК (1) і НЦ із ХД (2) та від старіння (б): до термічного старіння (1) та після старіння (2)

Як видно із наведених даних, величина електричної міцності паперу зростає із збільшенням вмісту НЦ в його композиції. При цьому для НЦ із ХД спостерігається дещо більше зростання (близько 1,5 %) цього показника, що пояснюється більшою спорідненістю НЦ із ХД із сульфатною хвойною целюлозою – основним компонентом волокнистої композиції паперу – за рахунок більш щільної «зшивки» волокон останньої з НЦ. Дослідження зміни електричної міцності зразків паперу з 5 %-ним вмістом НЦ обох видів в процесі термічного старіння показали ті ж тенденції, які аналогічні впливу НЦ на механічні властивості (рис. 5 б). Як видно із наведених даних, під дією термічного старіння величина електричної міцності для паперу без вмісту НЦ не змінилась. Для паперу з вмістом НЦ із ВК електрична міцність зросла на 1,5 %, а з додаванням НЦ із ХД на 2,5 %. Таким чином, можна стверджувати про незначну відмінність у впливі НЦ із різної рослинної сировини на електричну міцність паперу та зміну її під час термічного старіння. Отримані закономірності позитивного впливу НЦ на показник електричної міцності електроізоляційного паперу підтверджено

результатами інших дослідників [6,7], які показали зростання механічних показників паперу із введення НЦ в їх волокнисту композицію.

Важливою електроізоляційною характеристикою паперу є показник «Тангенс кута діелектричних втрат» ($\text{tg } \delta$), який суттєво залежить від температури. Тому в роботі проведені дослідження впливу НЦ із різної рослинної сировини на цей показник в експлуатаційному діапазоні температур, результати яких наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність тангенса кута діелектричних втрат від температури зразків електроізоляційного паперу без додавання НЦ і з додаванням НЦ до термічного старіння (чисельник) і після термічного старіння (знаменник)

Температура, °С	20	60	90	100	110	120
Без додавання НЦ	0,0007/ 0,0013	0,0012/ 0,0019	0,0014/ 0,0020	0,0020/ 0,0029	0,0032/ 0,0042	0,0049/ 0,0059
З витратою 5 % НЦ із ВК	0,0009/ 0,0015	0,0015/ 0,0021	0,0016/ 0,0022	0,0023/ 0,0031	0,0035/ 0,0045	0,0052/ 0,0062
З витратою 5 % НЦ із ХД	0,0010/ 0,0017	0,0017/ 0,0024	0,0018/ 0,0025	0,0026/ 0,0034	0,0039/ 0,0048	0,0056/ 0,0065

Із наведених даних випливають дві важливі особливості:

1. Із введенням НЦ обох видів в композицію маси паперу величина тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$) зростає у всьому діапазоні робочих температур зразків електроізоляційного паперу.

2. Після термічного старіння значення $\text{tg } \delta$ також збільшуються для кожного виду НЦ у всьому діапазоні робочих температур.

Такі особливості пояснюються тим, що із введенням у масу паперу НЦ (незалежно від виду рослинної сировини) відбувається «стяжка» волокон паперу, що призводить, як уже підкреслювалось, до підвищення її щільності. З одного боку це покращує його механічні властивості, електричну міцність, але призводить до збільшення $\text{tg } \delta$, що підтверджується іншими даними [18,19]. Це збільшення пояснюється з фізичної точки зору тим, що зі збільшенням щільності паперу зростає опір повороту електричних диполів молекул у змінному електричному полі, тобто зростає складова втрат, пов'язаних з поляризацією. Оскільки щільність лишається підвищеною у всьому діапазоні температур, то відповідно і $\text{tg } \delta$ зростає для всього діапазону робочих температур.

Як видно з наведених у табл. 1 даних, зростання $\text{tg } \delta$ за температури 120 °С з введенням НЦ із ВК становить близько 6 %, а для НЦ із ХД – до 14 %. Така закономірність впливу НЦ із різної рослинної сировини підтверджується результатами попередніх досліджень механічних властивостей паперу (рис. 2 а) – НЦ із ВК дещо менше збільшує механічну міцність, ніж НЦ із ХД, а, отже, меншим впливом на збільшення щільності і меншими значеннями $\text{tg } \delta$ зразків електроізоляційного паперу у всьому діапазоні робочих температур. Зростання абсолютних значень $\text{tg } \delta$ паперу в процесі термічного старіння корелює із даними зростання механічної міцності паперу в процесі старіння (рис. 2 б), що і пояснює збільшення значень показника $\text{tg } \delta$ паперу після термічної обробки. При цьому варто звернути увагу на абсолютні значення $\text{tg } \delta$ паперу за температури 120 °С. За такої температури головною складовою діелектричних втрат виступає іонна провідність [22], яка обумовлена наявністю «забруднень» у матеріалі, що призводить до стрімкого росту його $\text{tg } \delta$.

Високі значення цього показника є непридатними для високоякісних видів електроізоляційного паперу, наприклад, конденсаторного паперу, призначеного для виготовлення силових конденсаторів для змінного струму, для яких цей показник впливає на термін їх експлуатації. Разом з тим, застосуванням спеціальних добавок, зокрема Al_2O_3 [23], можна досягти стабільної роботи конденсаторів. В інших випадках, для менш відповідальних застосувань електроізоляційного паперу, цілком допустиме його використання з наявністю введеної НЦ із різної рослинної сировини.

Як визначалося вище, введення НЦ в композицію волокнистої маси призводить до підвищення механічної та електричної міцності електроізоляційного паперу за рахунок певне підвищення його щільності, що мало було б привести і до зростання значень показника *діелектричної проникності* (ϵ). Залежність відносної діелектричної проникності паперу за 20 °С та 120 °С без введення НЦ та з її введенням обох видів

до та після старіння наведено на рис. 6. Із наведених даних видно, що з ростом температури зростає ϵ , що є закономірним, бо з ростом температури спостерігається і невелике зростання щільності паперу. Ще в більшій

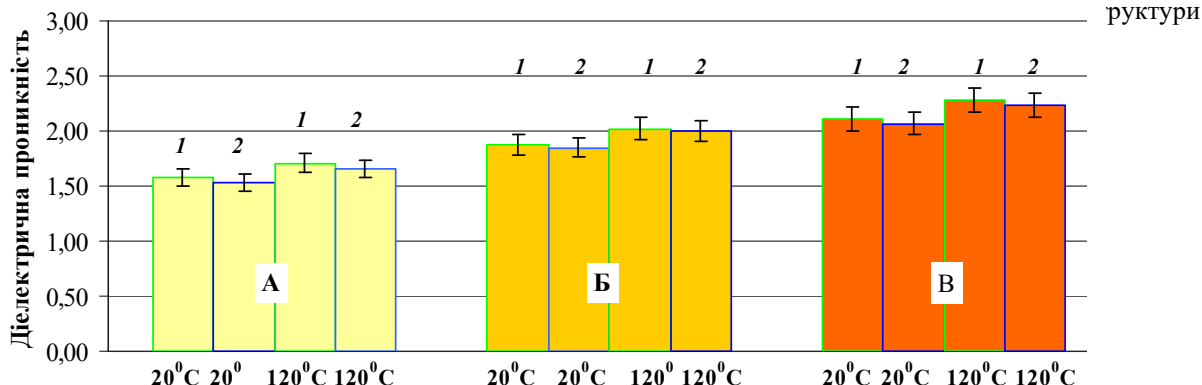


Рис. 6 - Залежність відносної діелектричної проникності паперу за 20°C та 120 °C без вмісту НЦ (А) та вмістом НЦ 5% із ВК (Б) і ХД (В) до (1) та після (2) термічного старіння

Під дією теплового старіння значення показника діелектричної проникності зменшилися на 1,5-3 % для зразків паперу з та без НЦ, причому для паперу з НЦ в меншій мірі, ніж для зразків паперу без НЦ. Таким чином, отримані результати дослідження мають науковий і практичний інтерес, оскільки збільшення показника діелектричної проникності паперу призводить до зростання ємності паперового конденсатора [16] та його питомої ємності.

Наступним важливим показником якості серед електроізоляційних характеристик паперу є його електропровідність водної витяжки. Зазвичай його нормують за гідромодуля 1 : 20 або 1 : 50, а його значення, наприклад, для кабельного паперу становить 120 мкСм/см за гідромодуля 1 : 20 [24]. Залежність величини електропровідності водної витяжки зразків паперу без НЦ і з введенням НЦ із різної рослинної сировини за гідромодуля 1 : 20 до та після термічного старіння наведено на рис. 7 а.

Як видно з рис. 7 а, введення НЦ обох видів практично не вплинуло на величину електропровідності паперу як до, так і після старіння. Це говорить про те, що НЦ, в особливості із волокон конопель, є достатньо добре очищеною і містить дуже мало сторонніх домішок. Підтвердженням цього є результати дослідження впливу НЦ на показник зольності паперу, особливо для НЦ із ВК, оскільки вихідна сировина – волокна конопель – мають вміст мінеральних речовин майже в 8 раз вищий, ніж у вихідній хвойній деревині. Проведені дослідження показали, що зольність паперу без вмісту НЦ була рівною 0,4 %, а після введення у волокнисту композицію 5 % НЦ із ХД і з волокон конопель зольність паперу становила 0,45 % і 0,5 %, відповідно, що навіть менше допустимого стандартом рівня 0,6 %. Отримані результати пояснюються ще й низькою витратою НЦ (5% від маси паперу), що несуттєво вплинуло на його зольність, зокрема і в процесі термічного старіння.

Важливою характеристикою целюлози, і, відповідно, паперу, є ступінь її полімеризації. Однак лише останнім часом цьому параметру почали приділяти велику увагу, що пов'язано, певно, з одного боку, із складністю аналізу її визначення, а з іншого – достатньо великим терміном служби паперу, що, фактично не потребувало звертатись до цього показника, який головним чином і вказував на стійкість целюлозного матеріалу до старіння. Застосування у виробництві паперу хімічних допоміжних речовин часто призводить до суттєвого скорочення терміну служби целюлозного матеріалу, і, відповідно, виробу з нього. Тому оцінка целюлозного матеріалу на величину ступеню полімеризації (СП) набуває важливого значення. Результати дослідження впливу НЦ із різної рослинної сировини на значення СП паперу без НЦ та з введеною НЦ до та після термічного старіння наведено на рис. 7 б. Як видно з наведених даних, значення СП як для паперу без НЦ, так і з додаванням НЦ обох видів, перевищує значення 1400, що суттєво більше рекомендованого більшістю споживачів електроізоляційного паперу значення СП 1200. Отримані результати свідчать про високу якість вихідної сульфатної хвойної невібіленої целюлози та, що принципово важливо – введення в

композицію маси паперу НЦ із різної рослинної сировини практично не знижує (в межах похибки – менше 3 %) величину СП електроізоляційного паперу.

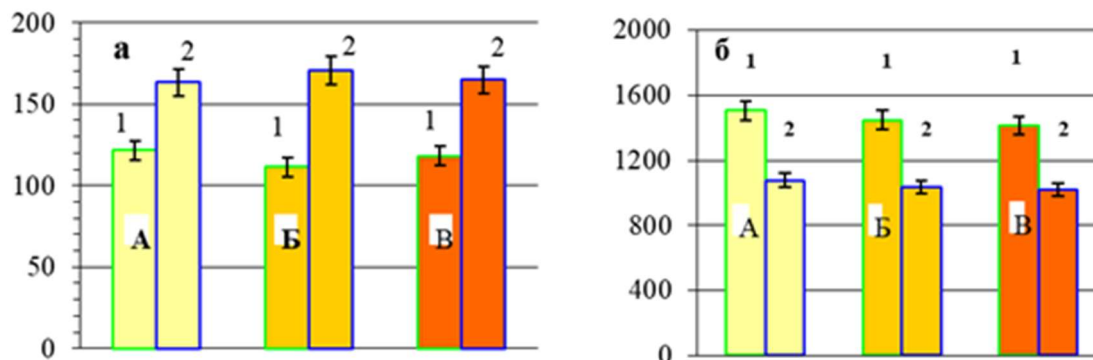


Рис. 7 – Електропровідність (мкСм/см) водної витяжки паперу за гідромодуля 20 : 1 (а) та ступінь полімеризації паперу (б) без вмісту НЦ (А) і з вмістом НЦ 5 % із ВК (Б) і ДХР (В) до (1) та після (2) термічного старіння

При цьому потрібно відзначити, що зниження СП після старіння для паперу з вмістом НЦ практично не відрізняється (менше 0,3 %) від зниження СП паперу без НЦ. Зниження СП для всіх зразків паперу (з та без НЦ) становило біля 28 %, що значно менше половинного значення згідно стандарту [20]. Особливо важливо це підкреслити для паперу з НЦ із ВК, для якого можна було очікувати більшого спаду СП, однак вибір конопляних волокон для електроізоляційного паперу показав позитивні результати.

Проведеними дослідженнями також встановлено, що додавання 5 % НЦ із різної рослинної сировини до волокнистої маси не призвело до помітного впливу на показник капілярної вбирності паперу, значення якого були на рівні 10 мм, що відповідає вимогам стандарт (5–13 мм).

Висновки

1. Підтверджено, що додавання в композицію паперової маси електроізоляційного паперу від 1 % до 5 % НЦ із різної рослинної сировини призводить до зростання механічної і електричної міцності паперу як до, та і після його термічного старіння.

2. Встановлено, що вплив НЦ із волокон конопель на показники якості електроізоляційного паперу не поступається дії на них НЦ із хвойної деревини, а в деяких випадках спостерігається кращий результат, наприклад, на зростання показника число подвійних перегинів паперу (за витрати 5 % НЦ із ВК цей показник був на 4 % більше, ніж для НЦ із ХД).

3. Показано незначне зростання рН водної витяжки паперу електроізоляційного паперу із введенням НЦ обох видів після проведення процесу термічного старіння, що сприяло додатковому збільшенню механічних показників якості паперу.

4. Доведено позитивний вплив НЦ із рослинної сировини та температури зразків у робочому діапазоні 20–120 °С на зростання значень тангенса кута діелектричних втрат електроізоляційного паперу.

5. Показано збільшення значень діелектричної проникності та зниження електропровідності паперу з введенням НЦ обох видів, що має позитивний вплив на решту його електроізоляційних властивостей. Встановлено, що зростання електропровідності паперу в процесі термічного старіння відбувається в однаковій мірі як для паперу з НЦ, так і без НЦ.

6. Встановлено, що введення НЦ у композицію паперу практично не знижує його ступінь полімеризації, що має велике значення для підтримання високої надійності та довгої тривалості роботи паперової ізоляції.

7. Отримані результати мають науково-практичне значення для інших видів ізоляційних паперів: конденсаторного, кабельного, телефонного, просочувального, трансформаторного, тощо.

Перспективи подальших досліджень. Перспективою подальших досліджень може бути використання наноцелюлози з іншої рослинної сировини у виробництва різних видів паперу та картону.

Список використаної літератури

1. Sree L. Rubanenko O., Rubanenko O., Labzun M. Dielectric properties analysis of paper capacitor //AIP Conference Proceedings 2269(1) : 30020. October 2020.
2. Looking At The Transformer Kraft Paper. // Electrical India, June 5, 2016.
3. Brodin F.W., Gregersen Q.W., Syverud K. Cellulose nanofibrils: Challenges and possibilities as a paper additive or coating material – A review. // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2014. 29(1). P. 156 – 166.
4. Hubbe M.A., Ferrer A., Tyagi P., Yin Y. Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: review. // BioResources. 2017. 12(1). P. 2143 – 2233.
5. Yu S., Sun J., Shi Y., Wang Q., Wu J., Liu J. Nanocellulose from various biomass wastes: Its preparation and potential usages towards the high value-added products. // Environmental Science and Ecotechnology. 2021. 5. P. 100077. DOI:10.1016/j.ese.2020.100077.
6. Ao L., Dezhong X., Lu L., Yalan Z., Wen Y. at al. Overview of nanocellulose as additives in paper processing and paper products. // Nanotechnology Reviews. 2021. 10. P. 264 – 281. DOI:10.1515/ntrev-2021-0023.
7. Huang J, Zhou Y, Dong L, Zhou Z, Liu R. Enhancement of mechanical and electrical performances of insulating presspaper by introduction of nanocellulose. // Compos Sci Technol. 2017. 138. P. 40–8.
8. Jianwen H., Yuanxiang Z., Longyu D., Zhongliu Z., Xiangjun Z. Enhancing Insulating Performances of Presspaper by Introduction of Nanofibrillated Cellulose. // Energies. 2017. 10(5), P. 681. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/681>.
9. Bárta J., Hájková K., Sikora A., Jurczykóvá T., Popelková D. at al. Effect of a Nanocellulose Addition on the Mechanical Properties of Paper. // Polymers. 2024. 16. P. 73. DOI:10.3390/polym16010073.
10. Worku L.A., Bachheti A., Bachheti R.K., Rodrigues C.E., Chandel A.K. Agricultural Residues as Raw Materials for Pulp and Paper Production: Overview and Applications on Membrane Fabrication // Membranes (Basel). 2023. 13(2). P. 228. DOI:10.3390/membranes13020228.
11. Barbash V.A., Yashchenko O.V. Preparation, Properties and Use of Nanocellulose from Non-Wood Plant Materials. In: Novel Nanomaterials, Editor Krishnamoorthy K. – London: IntechOpen, 2021. P. 61-83. DOI:10.5772/intechopen.942721.
12. Барбаш В. А. Технології перероблення недеревної рослинної сировини у целюлозовмісну продукцію. Монографія - Київ: Каравела, 2022. – 360 с.
13. Барбаш В.А., Якименко О.С., Ященко О.В. Вплив конопляної наноцелюлози на показники якості паперу для пакування харчових продуктів. // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii, 2023. 6. P. 5 – 12.
14. Barbash V.A., Yashchenko O.V., Yakymenko O.S., Zakharko R.M. Extraction of organosolv pulp and production nanocellulose from hemp fibres. // KPI Science News. 2021. 3. P. 83-90.
15. Barbash V.A., Yashchenko O.V. Preparation and application of nanocellulose from non-wood plants to improve the quality of paper and cardboard // Appl. Nanosci. 2020. 10. P. 2705-2716.
16. ГОСТ 1931-80. Бумага электроизоляционная намоточная. Технические условия.
17. Барбаш В. А., Якименко О. С., Березовський Г. Г., Ященко О. В. Вплив очеретяної наноцелюлози на показники якості паперу-основи для шпалер. // Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving». 2024. 1(23). DOI: 10.20535/2617-9741.1.2024.300984
18. Yuanxin Y, Meng H., Jie M., Yanxiao S., Sheng S., Chunhe W. Effects of Hot Pressing Temperature and Pressure on Dielectric Properties of Aramid Insulating Paper. // Energies. 2022. 15(21). 8314.
19. Poirier N. A., Pikulik I. The effect of drying temperature on the quality of paper. // Drying Technology. 1997. 15 (6-8). P. 1869-1879.
20. ГОСТ 27710-88. Общие требования к методу испытания на нагревостойкость. https://dnaop.com/html/46900/doc-ГОСТ_27710-88
21. Stuhrke R. A. The development of permanent paper // Preservation of paper and textiles of historic and artificial value / ed. J. G. Williams ; Am. chem. soc. Washington, 1977. P. 24–36. (Adv. in chem ser.; no. 164).
22. Whitehead J. B. The dielectric losses in impregnated paper. // Electrical Engineering. 1933. 52(1) P. 51 – 52. DOI: 10.1109/EE.1933.6430594.
23. Силовые электрические конденсаторы – промышленные типы конденсаторной бумаги. <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/silovye-elektricheskie-kondensatory-8.html>

24. ГОСТ 23436-83. Бумага кабельная для изоляции силовых кабелей на напряжение до 35 кВ включительно. Технические условия. https://dnaop.com/html/75596/doc-ГОСТ_23436-83.

Olha Yakymenko, Valerii Barbash, Olga Yaschenko

THE INFLUENCE OF NANOCELLULOSE FROM DIFFERENT PLANT RAW MATERIALS ON THE QUALITY INDICATORS OF ELECTRICAL INSULATION PAPER

An urgent scientific and practical task for electrical engineering enterprises is to improve the specific characteristics of component transformers and capacitors that use electrical insulating paper. Electrical insulating paper is characterized by a wide list of special quality indicators, the necessary values of which are achieved due to the use of cellulose with special properties and various chemical auxiliary substances. There are known attempts to use nanocellulose (NC) from wood to reduce the consumption of harmful synthetic chemical auxiliaries, but there are practically no research results on the impact of consumption of NC from non-wood plant materials. Therefore, in the work, a comparative study of the effect of NC from hemp fibers and coniferous wood on the target indicators of the quality of electrical insulating paper was carried out. For this, cellulose, suitable for extracting NC from hemp fibers, was obtained by an environmentally safe organosolv method. NC is obtained as a result of acid hydrolysis of organosolv hemp and sulfate unbleached coniferous cellulose, which is traditionally used in the production of electrical insulating paper.

Laboratory samples of electrical insulating paper were made with a weight of 65 ± 3 g/m² from sulfated unbleached coniferous cellulose with the addition from 1% to 5% NC by weight of paper. The research results confirmed the hypothesis that the addition of NC paper pulp from various plant raw materials leads to an increase in the mechanical and electrical strength of the paper. It has been established that the effect of NC from hemp fibers on the quality indicators of electrical insulation paper is not inferior to the effect on them of NC from coniferous wood, and in some cases even a better result is observed. It was established that the introduction of NC into the composition of paper practically does not reduce its degree of polymerization, which is of great importance for maintaining high reliability and a long duration of work of paper insulation. The obtained results have scientific and practical significance for other types of insulating papers: capacitor, cable, telephone, impregnation, transformer, etc.

Keywords: *nanocellulose, electrical insulating paper, quality indicators, mechanical and electrical strength, environmental friendliness, resource efficiency*

References

1. Sree, L., Rubanenko, O., Rubanenko, O., Labzun, M. (2020), "Dielectric properties analysis of paper capacitor Dielectric Properties Analysis of Paper Capacitor", *AIP Conference Proceedings*, no 2269(1), pp.30020.
2. Looking at the transformer kraft paper. *Electrical India*, June 5, 2016.
3. Brodin, F.W., Gregersen, Q.W., Syverud, K. (2014), "Cellulose nanofibrils: Challenges and possibilities as a paper additive or coating material – A review", *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, no 29(1), pp. 156-166.
4. Hubbe, M.A., Ferrer, A., Tyagi, P., Yin, Y. (2017), "Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: review", *BioResources*, no 12(1), pp. 2143-2233.
5. Yu, S., Sun, J., Shi, Y., Wang, Q., Wu, J., Liu, J. (2021), "Nanocellulose from various biomass wastes: Its preparation and potential usages towards the high value-added products", *Environmental Science and Ecotechnology*, no 5, pp. 100077. DOI:10.1016/j.ese.2020.100077.
6. Ao, L., Dezhong, X., Lu, L., Yalan, Z., Wen, Y. et al. (2021) "Overview of nanocellulose as additives in paper processing and paper products", *Nanotechnology Reviews*, no 10, pp. 264–281. DOI:10.1515/ntrev-2021-0023.
7. Huang, J., Zhou, Y., Dong, L., Zhou, Z., Liu, R. (2017), "Enhancement of mechanical and electrical performances of insulating presspaper by introduction of nanocellulose", *Compos Sci Technol.*, no 138, pp. 40–48.

8. Jianwen, H., Yuanxiang, Z., Longyu, D., Zhongliu, Z., Xiangjun, Z. (2017) “Enhancing insulating performances of presspaper by introduction of nanofibrillated cellulose”, *Energies*, no 10(5), p. 681. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/681>.
9. Bárta, J., Hájková, K., Sikora, A., Jurczyková, T., Popelková, D., Kalous, P. (2024) “Effect of a Nanocellulose Addition on the Mechanical Properties of Paper”, *Polymers*, no 16, p. 73. <https://doi.org/10.3390/polym16010073>
10. Worku, L.A., Bachheti, A., Bachheti, R.K., Rodrigues, C.E., Chandel, A.K. (2023) “Agricultural residues as raw materials for pulp and paper production: overview and applications on membrane fabrication” *Membranes (Basel)*, no 13(2). p. 228. DOI:10.3390/membranes13020228.
11. Barbash, V.A., Yashchenko, O.V. (2021) “Preparation, properties and use of nanocellulose from non-wood plant materials. In: Novel Nanomaterials, Editor Krishnamoorthy K.” *London: IntechOpen*, p. 61-83. DOI:10.5772/intechopen.942721.
12. Barbash, V.A. (2022) “Technologies of processing non-wood plant raw materials into cellulose-containing products monograph” - Kyiv: *Karavela*, p. 360.
13. Barbash, V.A., Yakymenko, O.S., Yashchenko, O.V. (2023) “The effect of hemp nanocellulose on the quality indicators of food packaging paper” *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, no. 6, pp. 5-12.
14. Barbash, V.A., Yashchenko, O.V., Yakymenko, O.S., Zakharko, R.M. (2021) “Extraction of organosolv pulp and production nanocellulose from hemp fibres” *KPI Science News*, vol.3, p. 83-90.
15. Barbash, V.A., Yashchenko, O.V. (2020) “Preparation and application of nanocellulose from non-wood plants to improve the quality of paper and cardboard”, *Appl. Nanosci.*, vol.10. p. 2705-2716.
16. GOST 1931-80. Electrically insulating winding paper. Technical conditions.
17. Barbash, V. A., Yakymenko, O. S., Berezovskyi, H. G., Yashchenko, O. V. (2024) “The effect of reed nanocellulose on the quality indicators of the base paper for wallpaper”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Series “Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving”* no 1(23). DOI: 10.20535/2617-9741.1.2024.300984.
18. Yuanxin, Y., Meng, H., Jie, M., Yanxiao, S., Sheng, S., Chunhe, W. (2022) “Effects of hot pressing temperature and pressure on dielectric properties of aramid insulating paper”, *Energies*, no 15(21), p. 8314.
19. Poirier, N. A., Pikulik, I. (1997) “The effect of drying temperature on the quality of paper”, *Drying Technology*, no. 15(6-8), pp. 1869-1879.
20. GOST 27710-88. General requirements for the heat resistance test method. https://dnaop.com/html/46900/doc-ГОСТ_27710-88.
21. Stuhrke, R. A. (1977) “The development of permanent paper” *Preservation of paper and textiles of historic and artificial value*. [ed. J. G. Williams ; Am. chem. soc. Washington]. p. 24–36. (Adv. in chem ser.; no. 164).
22. Whitehead, J. B. (1933) “The dielectric losses in impregnated paper”, *Electrical Engineering*, no. 52(1), p. 51-52. DOI: 10.1109/EE.1933.6430594.
23. Power electric capacitors are industrial types of capacitor paper. <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/silovye-elektricheskie-kondensatory-8.html>.
24. GOST 23436-83. Cable paper for insulation of power cables up to 35 kV inclusive. Technical conditions. https://dnaop.com/html/75596/doc-ГОСТ_23436-83